



## **STAGE DE 3<sup>ème</sup> ANNEE ANNEE 2010-2011**

**Mise en œuvre expérimentale d'une nouvelle  
technique de mesure de propriétés thermiques par  
procédé inductif**

**Nom et prénom de l'étudiant : GARCIA VILLENA, Marc**

**Nom de l'entreprise / du laboratoire : Laboratoire EPM-SIMAP**

**Adresse : 1340 rue de la Piscine**

**Domaine Universitaire**

**38400 SAINT MARTIN D'HERES - France**

**Nom et prénom des Maîtres de Projet : ETAY Jacqueline**

**Confidentialité : NON**



# Remerciements

---

Je tiens tout d'abord à remercier Yves FAUTRELLE, directeur du groupe EPM, pour m'avoir permis de réaliser mon stage au sein du laboratoire.

Je remercie également à ma responsable de stage, Jacqueline ETAY, pour tous ses conseils, encouragements et patience.

Je n'oublie pas non plus Cyril COURTESSOLE, Carlos SORROCHE et Pascal SCHETELAT, qui m'ont aidé à résoudre problèmes que j'ai trouvés pendant tout ce temps. Je remercie aussi Colin PARLIER, Christian GARNIER et Gabriel FOURNIER, qui m'ont aidé avec le dispositif expérimental.

Enfin, je souhaite également adjoindre à ces remerciements tous les personnels de l'EPM pour leur accueil chaleureux et leur sympathie.

# Résumé

---

Ce rapport présente la continuation du projet ITheC, qui a été commencé par Pascal Schetelat et Jacqueline Etay. Ce projet étudie la viabilité d'une nouvelle technique pour l'obtention des propriétés thermiques des matériaux métalliques (Capacité calorifique et conductivité thermique) avec une mesure indirecte pour des échantillons solides qui présentent un grand nombre de Biot ( $Bi > 0.4$ ). En basant la modulation de la puissance Joule en un pseudo bruit blanc et un système d'identification, on peut trouver la fonction de transfert de la variation de température dans l'échantillon due à la variation de la puissance calorifique. On détermine la capacité calorifique et la conductivité thermique en égalant les fonctions de transfert mesurées en deux points avec le modèle analytique proposé par Fetch [1991] et Wunderlich [2005]. Finalement, avec un algorithme de Gauss-Seidel, on trouve la solution du problème.

# Abstract

---

This manuscript presents the continuation of the ITheC project, started by Pascal Schetelat and Jacqueline Etay. This project studies the viability of a new technique to obtain the thermal properties of metals (heat capacity and thermal conductivity) for an indirect measurement in solid samples presenting large Biot numbers ( $Bi > 0.4$ ). The heat power is modulated by a pseudo-white noise and joined to an identification system, the temperature variation transfer function on the sample due the heat power variation is calculated. The heat capacity and the thermal conductivity are determined by equalling the measured transfer functions with the analytical transfer function coming from the model proposed by Fetch [1991] and Wunderlich [2005]. Finally, the solution of the problem is found using a Gauss-Seidel algorithm.

# Sommaire

---

1	Introduction.....	6
2	Le Projet ITheC .....	10
2.1	Montage expérimental .....	10
2.1.1	Circuit RLC et Générateur.....	11
2.1.2	Circuit de vide.....	12
2.1.3	Cartes d'acquisition .....	13
2.1.4	Sonde Rogowski .....	14
2.2	Mise en oeuvre de l'expérience .....	15
2.2.1	Etalonnage du circuit RLC.....	15
2.2.2	Marche à suivre pour l'étalonnage du circuit RLC .....	16
2.2.3	Etalonnage du barreau de Niobium .....	17
2.2.4	Etalonnage du barreau de Fer Pur .....	19
2.3	Expériences.....	22
2.3.1	Marche à suivre pour les expériences.....	23
2.4	Expérience avec le barreau de Niobium.....	24
2.5	Expérience avec le barreau de Fer Pur .....	24
3	Résultats d'expérience .....	26
3.1.1	Expérience sur le barreau de Niobium.....	26
3.1.2	Expérience sur le barreau de Fer Pur .....	27
4	Analyse du programme Matlab.....	29
5	Conclusions.....	31
6	Perspectives.....	32
7	Références bibliographiques.....	34
Annexe 1	.....	35
Annexe 2	.....	43
Annexe 3	.....	48
Annexe 4	.....	53
Annexe 5	.....	70
Annexe 6	.....	87
Annexe 7	.....	109
Annexe 8	.....	126

# 1 Introduction

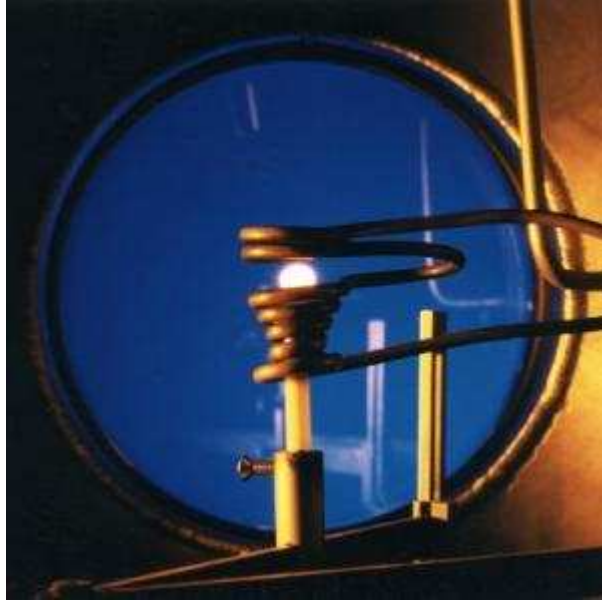
---

L'industrie a besoin de connaître les propriétés physiques des matériaux d'une façon précise pour savoir quels matériau et composition utiliser pour chaque pièce qu'on a dessiné. Grâce à une meilleur connaissance de leurs propriétés, on peut faire évoluer la technologie et on peut utiliser le matériau le plus approprié pour les efforts et les usures aux quels il sera soumis.

La calorimétrie modulée (Gmelin [1997]) a été une méthode de les plus utilisée pendant les 4 dernières décades pour l'investigation de petits échantillons tant à basses ( $<1\text{K}$ ) comme hautes températures ( $>3600\text{K}$ ). Ce méthode consiste en générer une oscillation périodique de puissance  $P(t)$  avec une fréquence  $2\omega$  qui chauffe l'échantillon, l'oscillation de la température est enregistré en fonction de le temps. Cette oscillation, est analysée en tenant en compte le délai et l'amplitude.

La qualité des résultats des simulations numériques des procédés d'élaboration des alliages métalliques (coulée continue, sous pression,...) dépend de la fiabilité que l'on peut accorder aux valeurs utilisées des propriétés thermophysiques (tension superficielle, masse volumique, viscosité, capacité et conductivité thermiques...) de ces alliages.

Pour obtenir des résultats plus précis, le Laboratoire SIMaP-EPM a idée une nouvelle façon de déterminer les propriétés thermiques des matériaux. Comment nouveauté, cette technique a la particularité de joindre la calorimétrie modulée avec la suppression du contact de l'échantillon de métal avec des autres matériaux. On peut obtenir cette isolation avec la machine idée pour Herlach [1993] et Egry [2001] basée en le travail d'Okress [1952], l'Electromagnetic Levitator (EML), financée pour l'agence spatiale européenne (ESA), qui s'embarqué dans des vols spatiaux (vols paraboliques, fusées-sondes et station spatiale internationale (ISS)). Il sert à mesurer les propriétés thermophysiques d'alliages métalliques fondus à très haut point de fusion ( $>1500^\circ\text{C}$ ). La microgravité permet de minimiser les mouvements à l'intérieur de la goutte fondue mais ne les suppriment pas entièrement.



**Figure 1. Electro Magnetic Levitator (EML)**

Le fonctionnement de l'EML consiste en mettre un échantillon sphérique conducteur de l'électricité (radius  $R$  et conductivité électrique  $\sigma_{ele}$ ) dans un inducteur où circule un courant d'haute fréquence ( $\omega_1 / 2\pi = 300 - 400 kHz$ ) d'intensité  $I_0$ , qui génère un champ électromagnétique (e.m.). En étant l'échantillon dans ce champ, les courants induits: 1) génère un effet Joule de densité  $\chi$  qui chauffe l'échantillon avec une puissance  $P$ . 2) l'interaction avec le champ génère forces électromagnétiques à l'intérieur de l'échantillon.

A la microgravité, un champ e.m. bipolaire est utilisé pour fondre l'échantillon et contrôler la température, et un champ e.m. quadripolaire centre l'échantillon dans l'inducteur. La densité de chaleur  $\chi$  est maximale à la zone équatoriale, et minimale à la zone polaire. Aussi, elle décroît exponentiellement de l'extérieur à l'intérieur d'accord à e.m. effet de peau avec une épaisseur de:  $\delta = \sqrt{2 / \mu_0 \sigma_{el} \omega_1}$ , où  $\mu_0$  est la perméabilité magnétique du vide ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} SI$ ).

Les techniques de calorimétrie modulée traditionnel (Kraftmakher [2002]), utilise échantillons solides avec une géométrie connue qui est chauffée avec une fréquence déterminée. La réponse de la température est mesurée. En tenant un petit numéro de Biot (qui est défini pour le ratio entre le transfert de chaleur globale extérieur et intérieur), on détermine la capacité de chaleur spécifique et la conductivité thermique de l'échantillon.

Dans l'EML, les courants induites qui sont modulées, génèrent un effet Joule à l'échantillon qui se chauffe. La température polaire est enregistrée, et la méthode analytique proposée pour Fecht [1991] et Wunderlich [2005] est utilisé pour mesurer la capacité calorifique  $C_p$  et la conductivité thermique  $\kappa_{th}$ . Cette technique requière un numéro de Biot très petit ( $Bi < 0.02$ ), et a été déjà vérifié pour Wunderlich [2001].

Le coût élevé de chacune des mesures nécessite une optimisation de l'utilisation de l'EML. A cette fin, le SIMaP défini et mis en œuvre une procédure originale de pilotage de cet instrument et d'analyse des mesures recueillies. A différence de l'expérience de Wunderlich [2001], le but est démontrer et valider la mesure pour échantillons avec un numéro de Biot grand.

Afin de contribuer à la fiabilisation de cette procédure, on a travaillé sur une installation disponible au laboratoire, on a mesuré la capacité calorifique et la conductivité thermique de divers métaux solides. Il s'a agité de piloter le chauffage de l'échantillon comme un pseudo bruit blanc puis d'analyser les enregistrements des températures en deux points de l'échantillon par une technique d'identification.



**Figure 2. Manip disponible au laboratoire pour l'étude du projet ITheC**

Premièrement, on doit mesurer la réponse thermique non stationnaire de l'échantillon dû la variation de la puissance de chauffage transmise pour l'inducteur. La température est enregistrée dans la position polaire ( $T_p$ ) et dans la position équatoriale ( $T_e$ ) en assumant une réponse linéal à la puissance  $P$ , en utilisant le modèle de la boîte noire (Richalet [1991]). Pour la modulation de la puissance on utilise un pseudo bruit blanc, qui apporte la possibilité de moduler avec une fréquence chosé. En utilisant un algorithme d'identification, on identifié les boîtes noire à déterminer. Après l'identification, on peut trouver la fonction transfère du modèle.



En deuxième lieu, en utilisant la transformation de Laplace, on trouve la capacité calorifique et le coefficient de transfert thermique avec une méthode indirecte. Les fonctions transfert analytiques sont obtenues en utilisant les propriétés géométriques et thermophysiques de l'échantillon. En égalant les fonctions transfert expérimentales et analytiques on trouve un système d'équations non linéaires (Annexe 3) d'où la résolution pour une méthode itérative pour Gauss-Seidel détermine les propriétés du matériel étudié.

Les expériences ont été réalisées sous vide dynamique. Le courant inducteur a été mesuré par une sonde Rogowski. Les températures ont été mesurées par pyrométrie aux points le plus chaud et le plus froid de l'échantillon ( $T_p$  et  $T_e$  respectivement). Le courant dans l'inducteur a été modulé autour de sa valeur d'équilibre par des créneaux de longueurs pseudo-aléatoires. Le traitement des données a été réalisé avec programmes (Matlab) de pilotage et d'analyse qui sont déjà écrits et validés.

Dans ce rapport on peut trouver la continuation de l'investigation de P. Schetelat et J. Etay. Pendant ce temps, on a trouvé problèmes avec l'exécution de l'identification dans les programmes de Matlab, et la majorité du temps de cette investigation a été destiné à il résoudre. Au le même temps, on a fait des expériences sur la manip, qui ont consisté en faire circuler un courant modulé (pseudo bruit blanc) sur un barreau de Niobium et un barreau de Fer pur. Pour chaque barreau, on a répété la séquence de bruit blanc 8 fois en différent intensité et amplitude de modulation.

## 2 Le Projet ITheC

---

L'ITheC est un projet qui doit valider d'un nouveau système pour mesurer les propriétés thermophysiques de matériaux métalliques. Cette technique consiste en utiliser un inducteur pour chauffer un barreau de matériau métallique dans un enceinte où on a fait le vide. Les données sont enregistrées avec le logiciel LabView, avec un pas de temps d'autour de  $10ms$  pendant toute l'expérience. Ensuite, les données sont traitées avec un programme dessiné spécifiquement pour le projet ITheC avec le logiciel mathématique Matlab.

### 2.1 Montage expérimental

Le montage expérimental du projet ITheC (Figure 3) consiste en: un générateur d'haute fréquence, un circuit RLC pour chauffer le barreau du métal, un circuit de vide qui permet d'avoir la quantité plus basse possible d'aire dans l'enceinte, une carte d'acquisition connectée à deux pyromètres et une sonde Rogowski pour enregistrer les données, et d'un programme de contrôle et de visualisation de données (LabView).

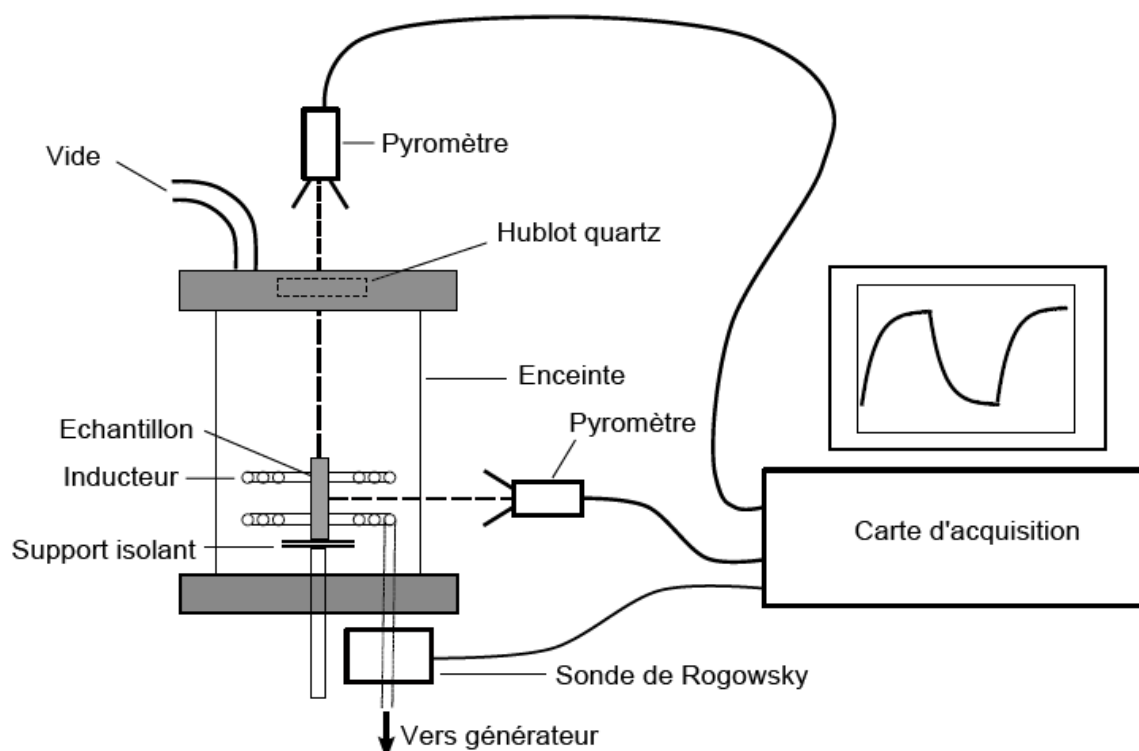


Figure 3. Schéma de l'expérience

### 2.1.1 Circuit RLC et Générateur

Le circuit RLC (Figure 4) est un circuit électrique qui contient de résistance ( $R$ ), inductance ( $L$ ) et capacité ( $C$ ). Il y a beaucoup d'utilisations de ce type de circuit, mais dans l'expérience on utilise pour chauffer un barreau métallique par un courant inducteur de la forme  $I_c = I_o \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) \cdot [1 + \alpha \cdot F(t)]$ , avec  $\alpha$  une amplitude relative de 50%, où:

- $I_o$ : Intensité pic du courant inducteur, qui est définie comment:

$$I_o = \frac{\pi}{2} \cdot \left\langle \|I_c\| \right\rangle_{\omega_1} \forall n \in \mathbb{N}$$

- $\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1$ : Fréquence angulaire de résonance du courant inducteur avec  $f_1 = 90\text{kHz}$  (Haute fréquence). ( $f_1$  est la fréquence quand il y a résonance ( $L \cdot C \cdot \omega_1^2 = 1$ )).
- Modulation de courant de base où  $F(t)$  est un pseudo bruit blanc.

A l'expérience, la capacité  $C$  vient donnée pour un coffret de condensateurs. La somme de tous els condensateurs qui sont disposés en parallèle est de  $C = 3.2\mu\text{F}$ . La résistance  $R$  vient donnée pur la résistivité électrique de chaque barreau à étudier et l'inductance  $L$  pour l'inducteur de la manip. Comment conséquence,  $L$  n'est pas fixé, son valeur changes pour chaque barreau différent.

L'équation différentielle qui décrit le comportement du circuit est normalement du second ordre, et une autre caractéristique du circuit RLC est que le quotient  $\frac{I_o}{V_o}$  augmente pour des certaines valeurs de fréquence quand il y a résonance.

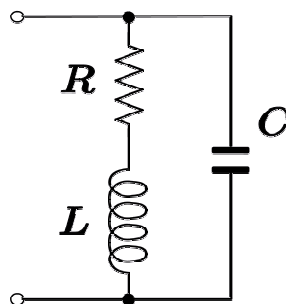


Figure 4. Schéma circuit RLC

On utilise ce circuit pour chauffer l'inducteur qui a les caractéristiques géométriques suivantes :

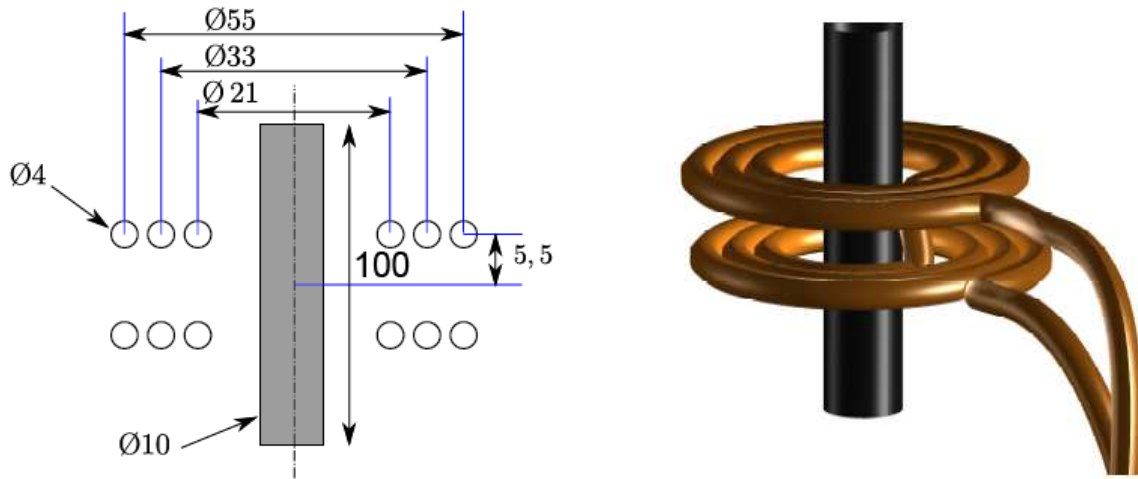


Figure 5. Géométrie de l'inducteur

La tension imposée commande la puissance fournie par le générateur. La fonction de la puissance (Définie par  $P = U \cdot I$ ) est décrite par le matériel (voir section 2.2) parce que pour chaque élément il y a une fonction  $I_0 = f(U_c)$  différente.

### 2.1.2 Circuit de vide

La présence d'humidité et d'air à l'enceinte pendant l'expérience provoque réactions chimiques qui sont préjudiciables pour le résultat de l'investigation. Est pour cela qu'il est établi sur la manip un circuit de vide qui permet arriver à une pression de  $0.08\text{mbar}$  à l'intérieur de l'enceinte. Pour assurer la minime influence de l'air on a établi deux mesures: 1) Avant de chaque expérience est nécessaire réaliser le vide, remplir l'enceinte d'argon (gaz inerte), et tourner à faire le vide. 2) L'expérience est réalisée en vide dynamique (la pompe de vide est toujours connectée) pour vérifier la validée des résultats si l'enceinte n'est pas étanche.

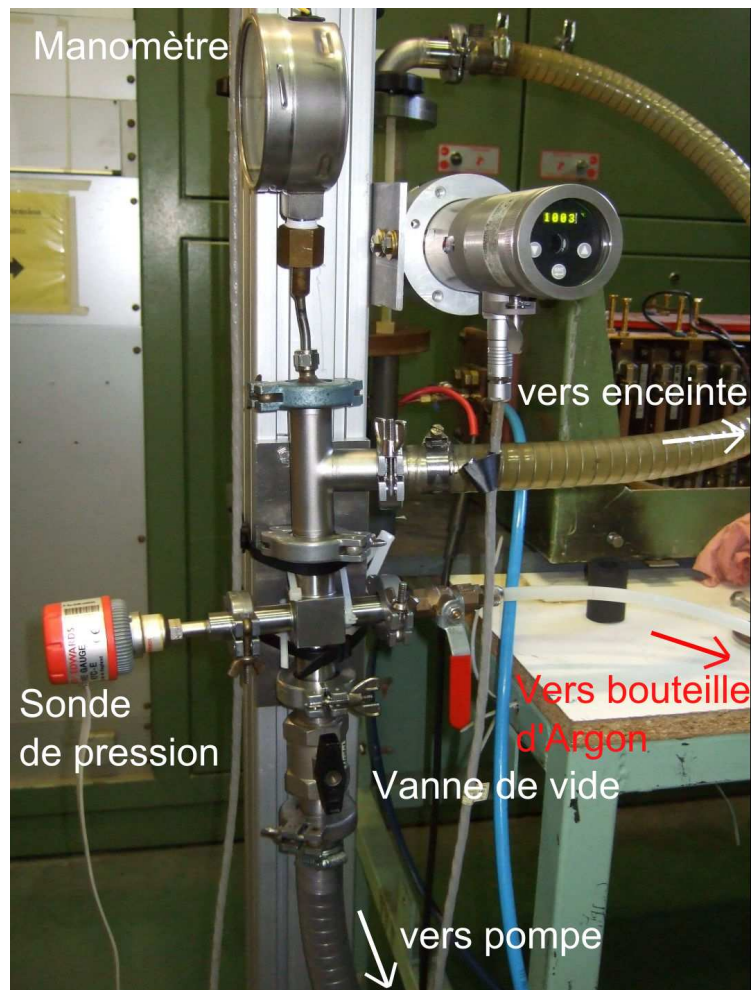


Figure 6. Composants du circuit de vide

### 2.1.3 Cartes d'acquisition

L'ordinateur qui est ajointé à la manip a trois cartes d'acquisition connectées:

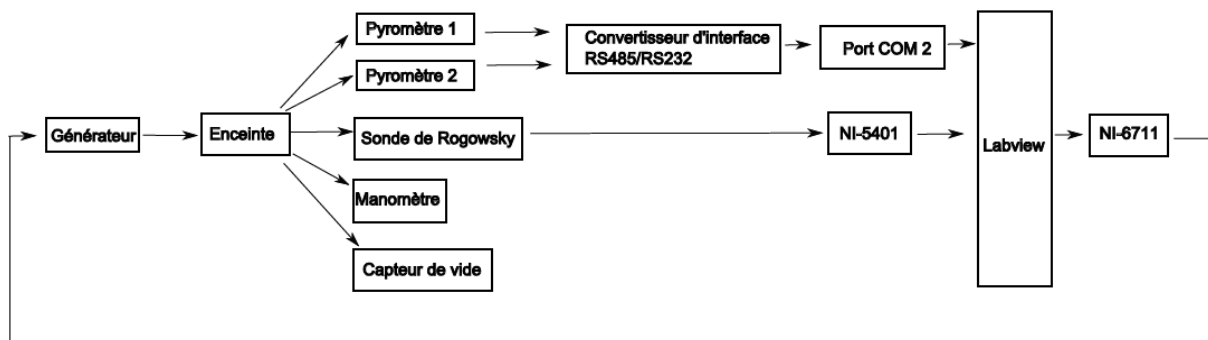
- Carte génératrice de signaux analogiques arbitraires NI 6711
- Carte génératrice de fonction analogique NI 5401
- Carte d'acquisition NI 5102

Leurs caractéristiques sont reportées dans le tableau 1:

Carte	Analogique		Numérique				
	Entrée	Sortie	I/O	Fréquence	Résolution (bit)	Gamme entrée	Gamme sortie
NI 6711	0	4	8	1M	12	-	±10V
NI 5401	0	1	0	40M	12	-	±5V ou ±10V
NI 5102	2 (simultanée)	0	0	Bande passante 15 MHz	8	De ±25mV à ±5V	
Total	2	5	8				

**Tableau 1. Caractéristiques des cartes d'acquisition**

Pour notre étude, seulement on a besoin d'utiliser les cartes NI 5401 et NI 5102. La carte NI 5401 est utilisée pour l'acquisition du commande du générateur, et la carte NI 5102 pour l'acquisition de la tension calculée pour la sonde Rogowski. L'acquisition des températures est réalisé par communication numérique via l'interface RS485, qui est convertée avant d'arriver a le port COM du ordinateur per un convertisseur RS485<-> RS232. On peut voir les connexions dans la figure 7 suivant:



**Figure 7. Schéma de connexions de la manip**

### 2.1.4 Sonde Rogowski

La sonde Rogowski (Figure 8) est un instrument de mesure qui s'utilise pour connaître le courant alternatif. Comment Costa [2005] cite, le fonctionnement de ce capteur est basé sur la loi de Faraday. La tension mesurée aux bornes des spires qui entourent le conducteur à mesurer est proportionnelle à la dérivée du flux créé par le passage du courant dans le circuit (mutuelle induction). Pour avoir une image du courant, la tension de bobinage est intégrée:

$$V_b = M \frac{dI}{dt} \rightarrow I = \frac{1}{M} \int V_b dt$$

Où:

- $V_b$  : tension aux bornes du bobinage
- $M$  : mutuelle entre le conducteur central et le bobinage

Le bobinage est disposé suivant un trajet fermé pour capturer la totalité du flux orthoradial créé par le courant à mesurer. Le conducteur constituant la bobine se referme par le centre du bobinage, formant un retour coaxial afin d'être insensible au flux parasite dans la surface formée par le bobinage circulaire. Par la mesure de la tension aux bornes de la bobine, la sonde donne le courant circulant et la fréquence du circuit oscillant avec une erreur maximale de 3%.

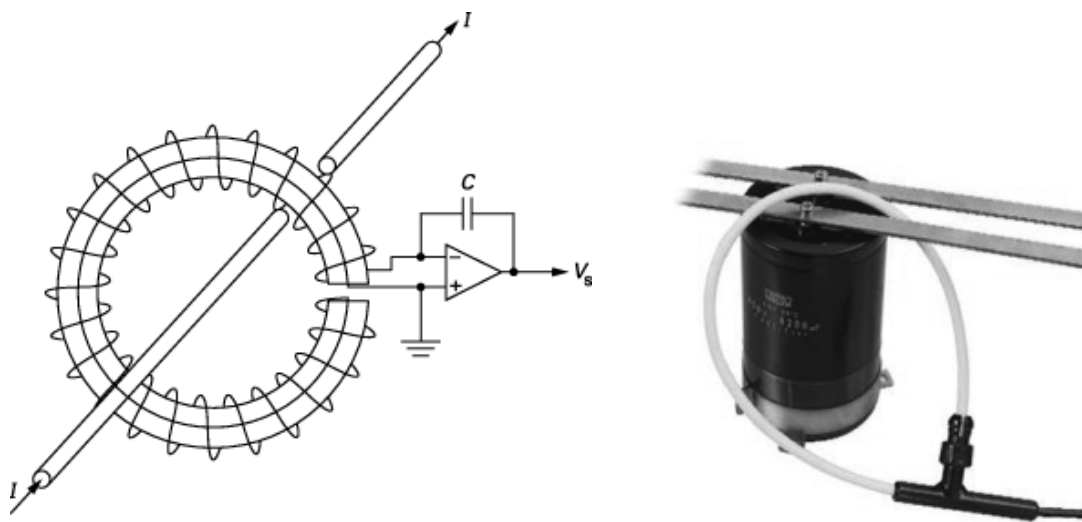


Figure 8. Schéma de fonctionnement et disposition du Sonde Rogowski

## 2.2 Mise en oeuvre de l'expérience

Comment on a dit antérieurement, les matériaux métalliques à étudier ont été le Niobium et le Fer pur. On a choisi le Niobium pour comparer les résultats obtenus avec ceux que P. Schetelat avait obtenus, et le Fer pur parce que c'est le métal avec des propriétés plus neutres, et si l'expérience a un résultat acceptable on pourra dire que l'IThC est valide pour tous les métaux.

### 2.2.1 Etalonnage du circuit RLC

Pour chaque matériel on a de considérer un comportement différent de la manip (du générateur) grâce à ces différentes valeurs de  $R$  et  $L$  des métaux. C'est pour cette raison qu'on a de trouver la courbe d'étalonnage du circuit électrique pour chaque matériel.

La valeur de  $R$  et  $L$  pour chaque barreau a été obtenue par la méthode expérimentale du « décrétement logarithmique ». Le principe de la mesure (R. Ernst [1996]), consiste à charger le condensateur du circuit oscillant par une tension continue puis à analyser la décroissance de la tension  $U(t)$  lors de la décharge du condensateur. A partir du signal recueilli, on peut calculer les caractéristiques électriques du circuit.

Pour déterminer la courbe, les données de la réponse du courant circulant pour un changement de tension ont été reprises. La variation de l'intensité de courant a été contrôlée avec le programme LabView, et on a travaillé dans un intervalle de  $0V$  à une valeur de tension de consigne  $U_c(V)$  limitée pour la température de fusion de chaque métal car on voulait être certain de ne pas fondre le barreau.

Pour cette expériences est important remarquer que la tension de consigne  $U_c(V)$  est traduite en deux fois la valeur en kV dans le générateur. Alors, par exemple, quand on travaille avec  $U_c = 0.2V$  le générateur apporte une tension de  $U_g = 0.4kV$ .

Les mesures de sont réalisées par une sonde Rogowski du commerce. Cette sonde permet de mesurer l'intensité du courant dans l'inducteur et la fréquence du circuit oscillant.

### 2.2.2 Marche à suivre pour l'étalonnage du circuit RLC

Pour cette expérience, on n'a pas fait le vide parce qu'il n'y a pas besoin d'obtenir des résultats précis de la température. Tant la manip comment le générateur ont un circuit de refroidissement en eau. Il est vraiment important d'ouvrir ce circuit avant de commencer l'expérience parce que l'installation se chauffe rapidement et pourrait fondre ou casser certaine partie de la manip.

Une fois le circuit de refroidissement ouvert, on doit vérifier qu'il n'y a pas de fuites et que l'eau circule normalement. On connecte le générateur de puissance à *Haut Fréquence (HF)*, 90 kHz.

La sonde Rogowski est connectée autour de le câble conducteur à la sortie de l'inducteur, et le pyromètre qui mesure la température équatorial est allumé pour contrôler que la température est toujours plus basse que la de fusion du métal.

La tension  $U_c(V)$  de contrôle monte par palier de  $0.1V$  jusque la tension plus haute que le matériel peut supporter sans fondre. On remarque que la montée de la tension n'a pas été constante parce que pour certaines valeurs la puissance a été très élevée et n'a pas avait temps pour attendre une stabilisation de la température à chaque palier pour éviter un chauffage de l'installation qui peut avoir fondu quelque part de la manip. Alors, entre les



échelons, on a laissé un temps l'inducteur sans puissance pour permettre que l'eau de réfrigération baisse la température des parts plus chauds de la machine.

L'expérience a été réalisée pour le Niobium et pour le Fer pur. Les équations trouvées sont utilisées dans le programme Matlab pour faire l'identification

### 2.2.3 Etalonnage du barreau de Niobium

L'expérience est faite premièrement avec un barreau de Niobium qui a les caractéristiques du tableau 2.

#### Barreau de Niobium

Propriétés Thermophysiques	
Pureté	99.9 %
Etat	Recuit (polycristallin)
Capacité calorifique (à T=298.15K)	$268 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Conductivité thermique (à T=298.15K)	$53.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Masse volumique (à T=298.15K)	$8570 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Masse de l'échantillon	66.5 g
Coefficient de dilatation thermique (0 à 100°C)	$7.2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Température de fusion	2468 °C
Conductivité électrique (à T=298.15K)	$6.25 \cdot 10^{-6} (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$
Caractéristiques sur le circuit RLC	
Résistivité (R)	31.7525 mΩ
Inductance (L)	0.8954 μH
Capacité (C)	3.2 μF
Impédance (Z)	8.85037 Ω
Fréquence (f)	93.3442 kHz

Tableau 2. Propriétés Niobium

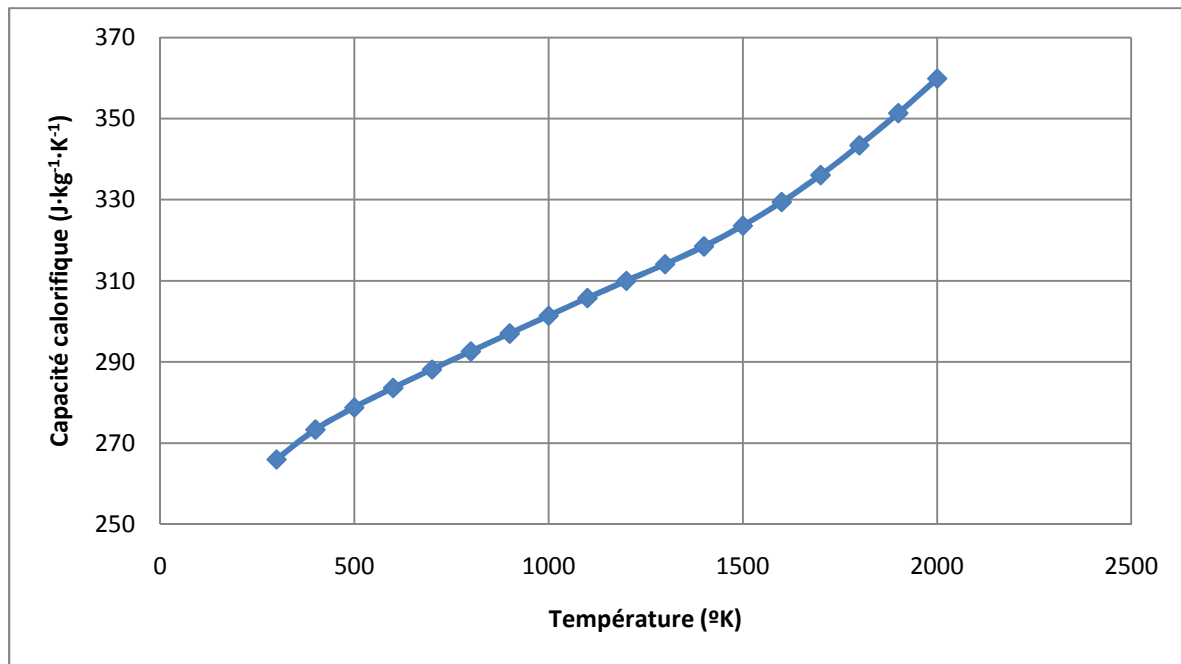


Figure 9. Capacité calorifique à pression constante du Niobium polycristallin Chase [1998]

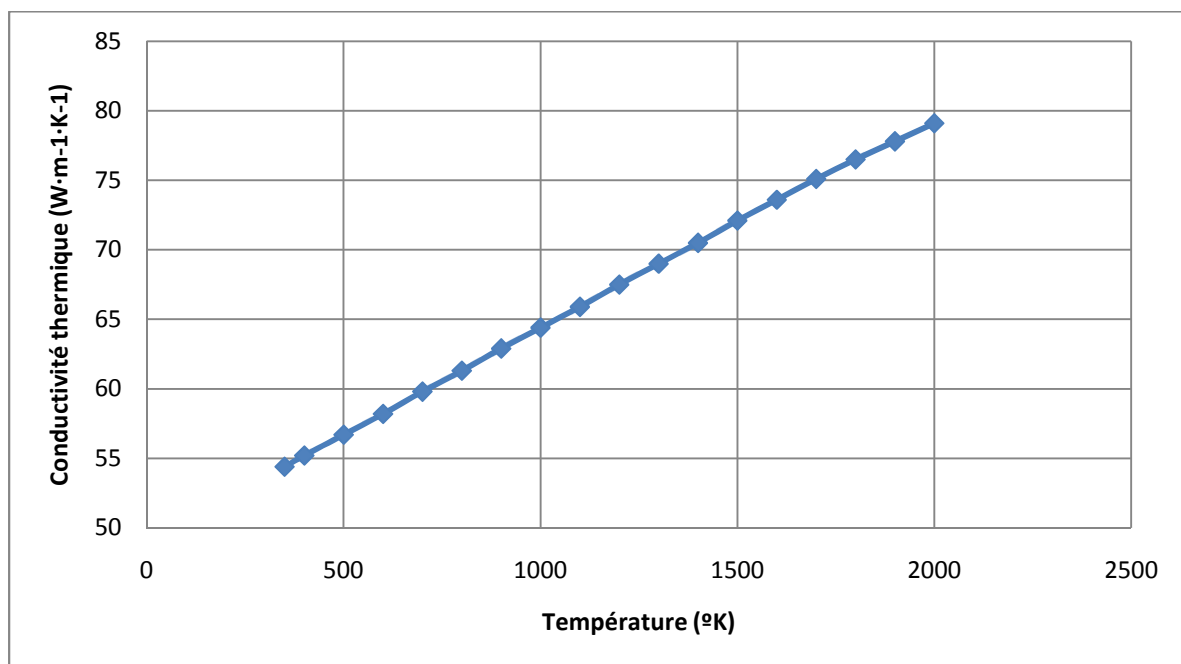


Figure 10. Conductivité thermique du Niobium polycristallin Ho et al. [1972]

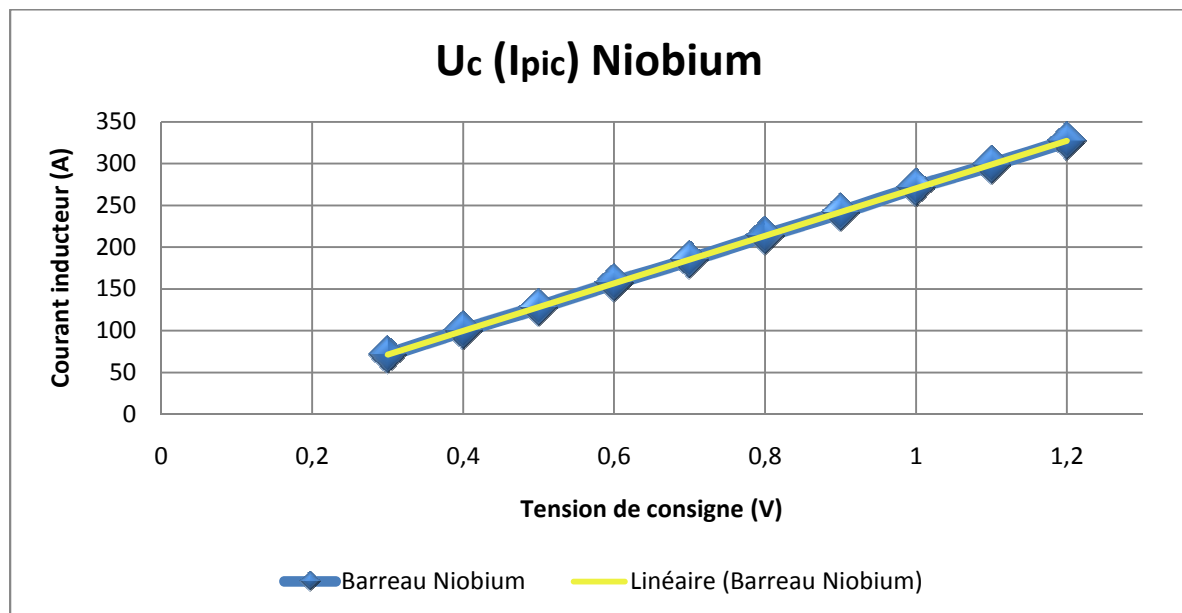
Les mesures reprises pour l'étalonnage sont établies dans le tableau 3:

Uc(V)	I <sub>pic</sub> (A)	I <sub>eff</sub> (A)
0	0	0
0,1	0	0
0,2	0	0
0,3	70,8	50,1
0,4	100,2	70,8

0,5	127,7	90,2
0,6	157	111
0,7	184,7	130,6
0,8	213,6	151,0
0,9	241,4	170,7
1	271,2	191,8
1,1	298,3	210,9
1,2	326,9	231,1

**Tableau 3. Données obtenues pour l'étalonnage du Niobium**

Les résultats de ces mesures sont portés sur la Figure 11. Comme attendu la variation d' $I_o$  avec  $U_c(V)$  est linéaire.



**Figure 11. Courbe d'étalonnage du courant de pic  $I_o$  dans l'inducteur en fonction de la tension de consigne  $U_c$  avec le barreau de Niobium**

D'où on peut trouver l'équation pour cet étalonnage:

- Pour le courant de pic:  $I(A_{pic}) = 284,32U_c(V) - 14,056$
- Pour le courant efficace:  $I(A_{eff}) = 201,04U_c(V) - 9,9394$

## 2.2.4 Etalonnage du barreau de Fer Pur

L'expérience est faite premièrement avec un barreau de Fer Pur qui a les caractéristiques du tableau 4.

### Barreau de Fer Pur

Propriétés Thermophysiques	
Pureté	99.9 %
Etat	Recuit (polycristallin)
Capacité calorifique (à T=298.15K)	$449.46 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Conductivité thermique (à T=298.15K)	$80.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Masse volumique (à T=298.15K)	$7874 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Masse de l'échantillon	62.195 g
Coefficient de dilatation thermique (0 à 100°C)	$11.8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Température de fusion	1538 °C
Conductivité électrique (à T=298.15K)	$1.105 \cdot 10^{-7} (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$

Caractéristiques sur le circuit RLC	
Résistivité (R)	83.0955 mΩ
Inductance (L)	1.07256 μH
Conductivité (C)	3.2 μF
Impédance (Z)	4.03361
Fréquence (f)	85.9107 kHz

Tableau 4. Propriétés Fer Pur

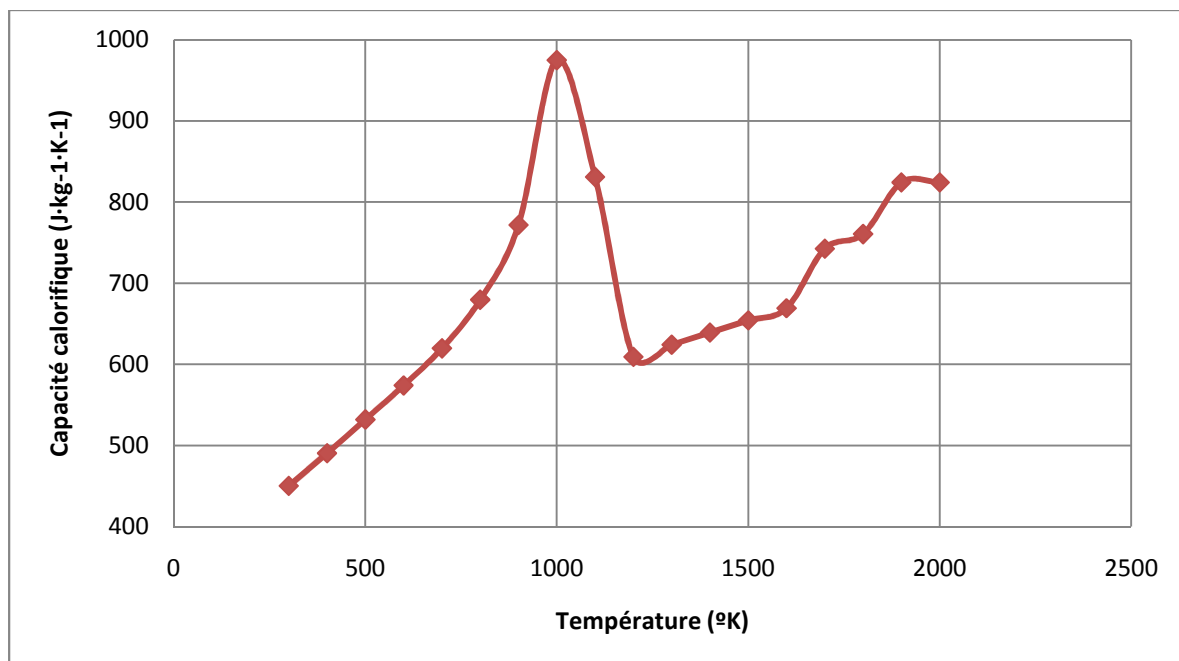
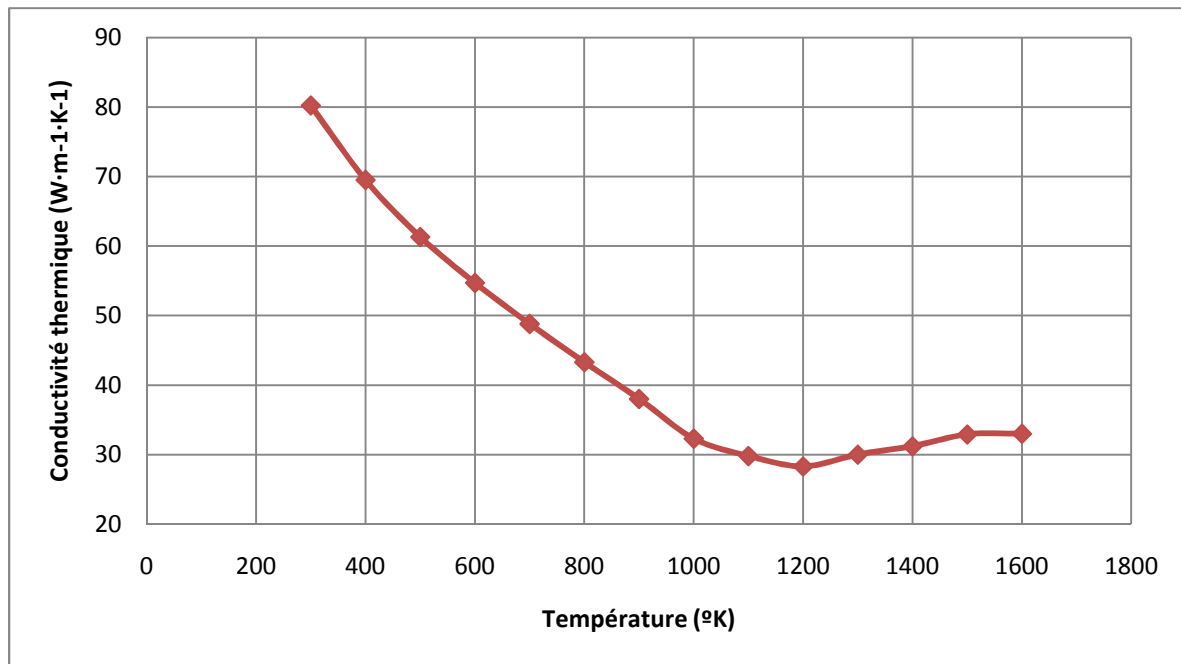


Figure 12. Capacité calorifique à pression constante du Fer Pur polycristallin Chase [1998]



**Figure 13. Conductivité thermique du Fer Pur Ho et al. [1972]**

Les mesures reprises pour l'étalonnage sont les établies dans le tableau 5:

$U_c(V)$	$I_{pic}(A)$	$I_{eff}(A)$
0	0	0
0,1	0	0
0,2	0	0
0,3	0	0
0,4	0	0
0,5	122,8	86,8
0,6	155	109,6
0,7	184	130,1
0,8	213,7	151,1

**Tableau 5. Données obtenues pour l'étalonnage du Fer Pur**

Les résultats de ces mesures sont portés sur la Figure 12. Comme attendu la variation d' $I_o$  avec  $U_c(V)$  est aussi linéaire.

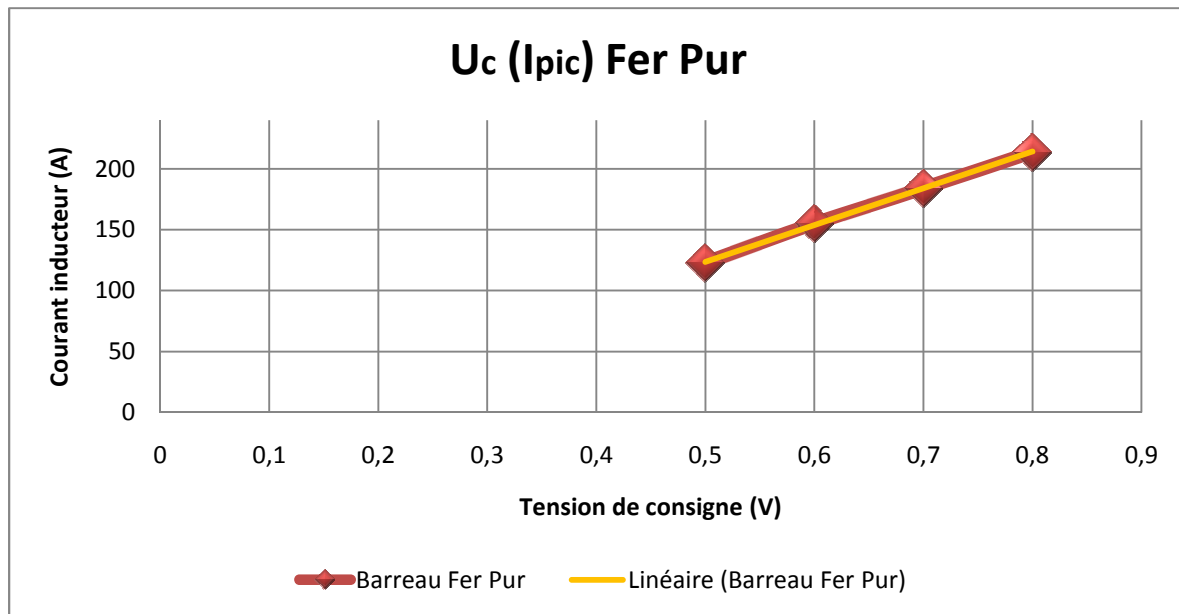


Figure 14. Courbe d'étalonnage du courant de pic  $I_o$  dans l'inducteur en fonction de la tension de consigne  $U_c$  avec le barreau de Fer Pur

D'où on peut trouver l'équation pour cet étalonnage:

- Pour le courant de pic:  $I(A_{pic}) = 301,7U_c(V) - 27,23$
- Pour le courant efficace:  $I(A_{eff}) = 213,33U_c(V) - 19,255$

## 2.3 Expériences

Les expériences sont réalisées pour retrouver les propriétés thermophysiques des matériaux. Elles consistent à faire circuler dans l'inducteur un courant alternatif qui chauffe l'échantillon. La tension de consigne du générateur est modulée par un pseudo bruit blanc antérieurement programmé avec le programme LabView. L'amplitude du bruit blanc est choisie par l'utilisateur avec le programme, et son longueur est fixée à 125 valeurs. On a défini un pas de temps de  $t_s = 4s$  et un pas de temps d'acquisition de  $1ms$ . La longueur de la séquence de mesure est de  $t = 500s$ . Les autres deux caractéristiques du bruit blanc sont qu'il a été créé avec 7 bits ( $N=7$ ) et un changement de valeur  $K=1$  (Nombre minimal de passes de temps où change son valeur), Chaque bruit blanc est répété 8 fois avec un courant et une amplitude différente. Les données obtenues sont traitées avec un programme Matlab pour trouver les valeurs des propriétés thermophysiques, dépendantes du matériau et de la température. Avec les différentes mesures, on peut déterminer la courbe qui représente chaque propriété pour l'intervalle de températures étudié.

### 2.3.1 Marche à suivre pour les expériences

Pour faire l'expérience, on doit avoir bien connecté et alimenté tous les instruments de mesure et d'acquisition de données: la sonde Rogowski, les deux pyromètres, les cartes d'acquisition, le manomètre, et l'ordinateur.

Le circuit réfrigérateur tant du générateur que de la manip est ouverts, et le vide est fait dans l'enceinte avec une sous-pression d'autour de 0.08mbar (avant, on a effectué quelques flushes d'argon pour éviter la présence d'oxygène). Après, on met sous tension le générateur en Haute Fréquence (HF) et en mode automatique dans le pupitre de contrôle (pour contrôler le courant depuis l'ordinateur).

Le programme LabView utilisé est nommé « ITheC 3.0 », avec la commande de données pour créer le bruit blanc « cmd\_Niobium ». On commence l'expérience et monte le courant à palier par palier doucement en mode manuel du programme LabView, pour permettre monter la température progressivement. On continue ainsi jusqu'à ce que la température mesurée par les deux pyromètres soit supérieure à 700°C. C'est la température minimale de travail des pyromètres. Quand la température est stabilisée, on doit choisir l'amplitude de la modulation du courant souhaitée et on clique sur le mode automatique du programme LabView pour lancer le bruit blanc.

On doit répéter ceci 8 fois en veillant à ne jamais dépasser la température de fusion du métal.

Dans la Figure 13 on peut voir la face avant du programme LabView utilisée. Les paramètres à contrôler sont le pas de temps d'acquisition et de SBPA, le % de modulation et la courant à la qu'on veut commencer le bruit blanc. Pour il commencer seulement il faut cliquer sur le bouton « Automatique ».

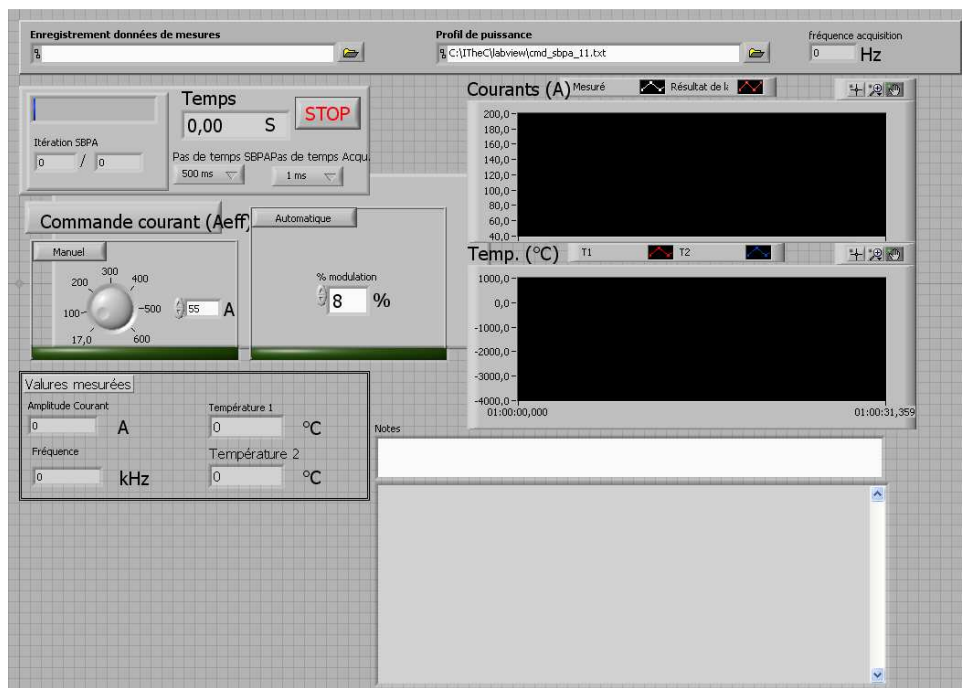


Figure 15. Face avant du programme LabView "ITheC 3.0"

## 2.4 Expérience avec le barreau de Niobium

Ces expériences ont été réalisées par Pascal Schetelat, elles sont reprises pour d'une part confirmer les résultats de Pascal. D'autre part apprendre à se servir de l'expérience du pilotage et des programmes de traitement.

n	k	ts (s)
7	1	4

Tableau 6. Paramètres de la SBPA (temps total=500s)

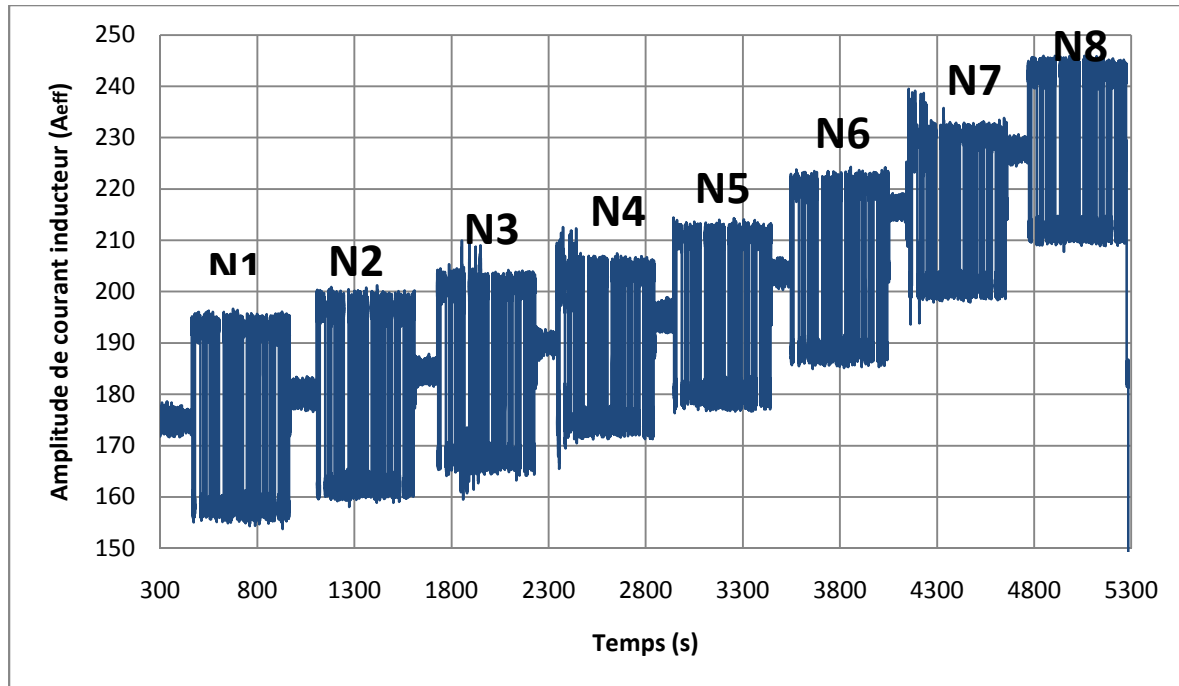


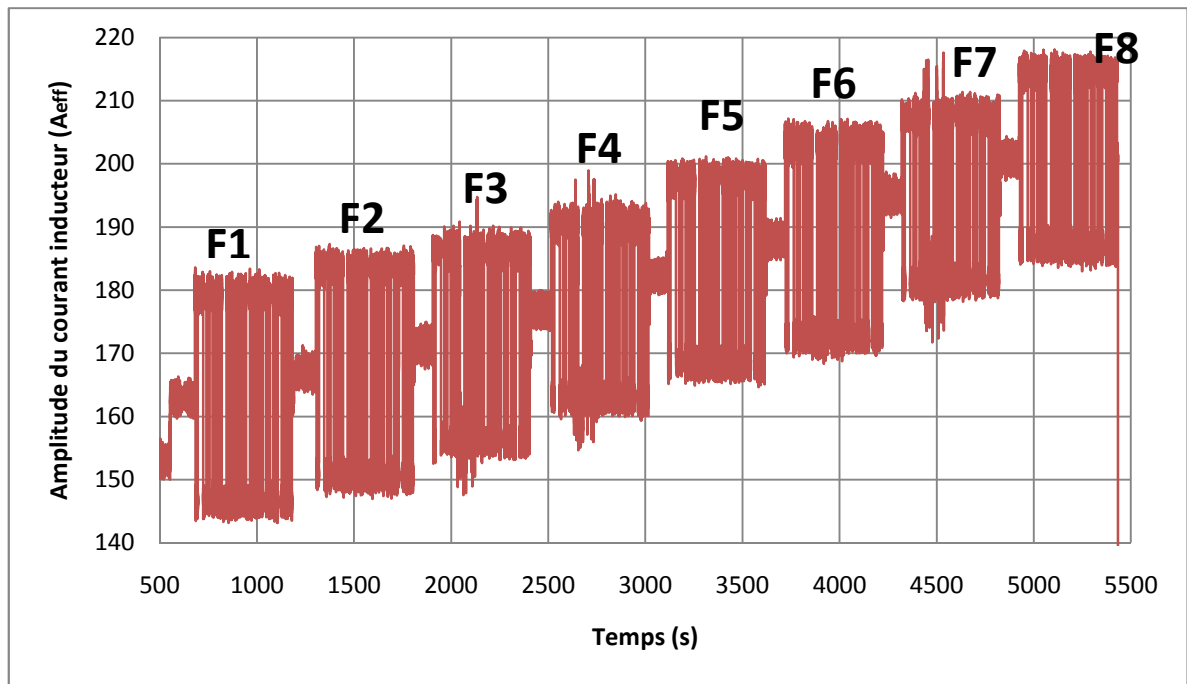
Figure 16. Mesure de l'amplitude du courant inducteur avec le barreau de Niobium

## 2.5 Expérience avec le barreau de Fer Pur

n	k	Ts (s)
7	1	4

Tableau 7. Paramètres de la SBPA (temps total=500s)





**Figure 17. Mesure de l'amplitude du courant inducteur avec le barreau de Fer Pur**

Lorsque la tension de consigne varie par palier et que cette tension est modulée par un bruit blanc par chacun des paliers.

### 3 Résultats d'expérience

#### 3.1.1 Expérience sur le barreau de Niobium

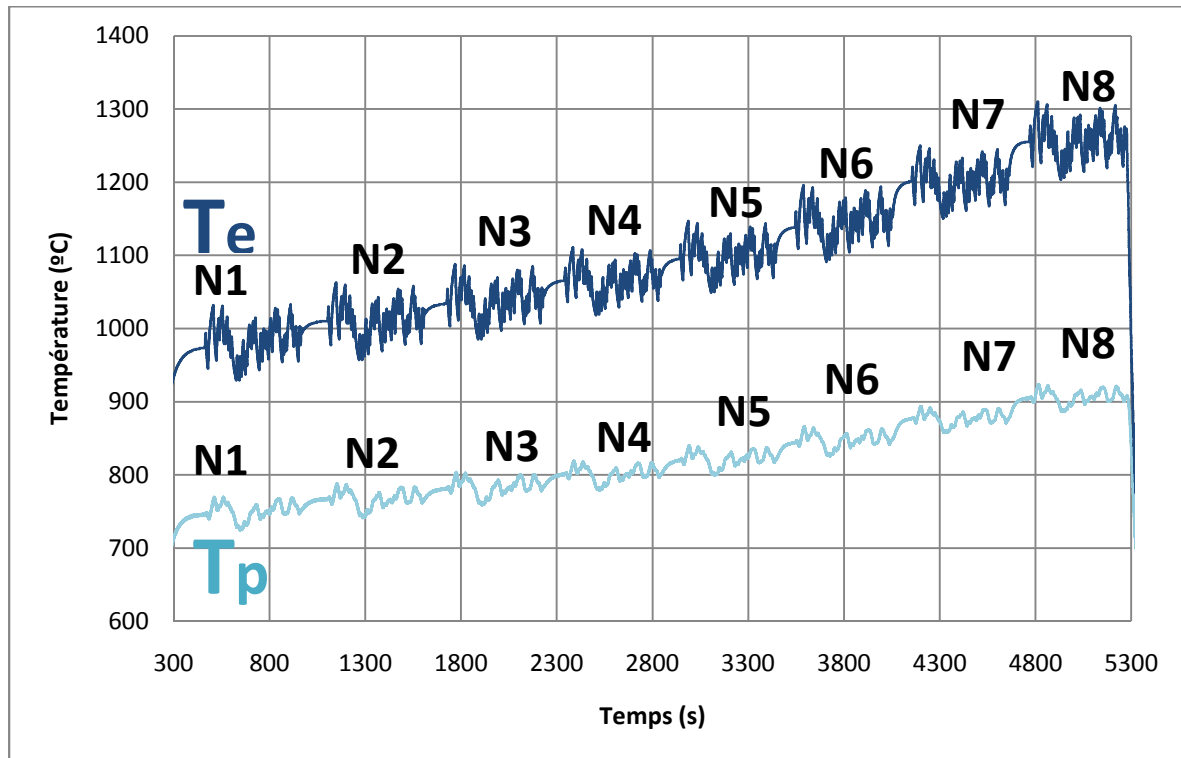


Figure 18. Evolution de Te et Tp en barreau de Niobium en fonction du temps

N° échelon	Amplitude du courant (A)	Amplitude de modulation (%)	$\bar{T}_e$ (°C)	$\bar{T}_p$ (°C)
1N	176	10	973	746
2N	180	10	1010	767
3N	184	9	1034	781
4N	191	8	1065	801
5N	196	8	1095	820
6N	205	8	1138	844
7N	217	7	1201	877
8N	226	7	1255	905

Tableau 8. Tableau des mesures moyennes relatives au Niobium

Où:  $\bar{T}_{e,p} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} T_{e,p}(t) dt$  avec  $\Delta t$  la durée d'une séquence (où palier).

L'étude des données du barreau de Niobium avec le programme Matlab est montrée dans l'Annexe 4.

Ces résultats sont comparés avec ceux de P. Schetelat dans l'Annexe 8.

Les résultats de l'identification de signaux ressemblent être fiables pour le barreau de Niobium. De plus, les temps caractéristiques  $\tau_{int}$  et  $\tau_{ext}$  ont valeurs assez similaires pour  $H_e$  et  $H_p$ .

Les résultats donnés par P. Schetelat dans son rapport d'avancement pour le 5ème échelon sont semblables aux résultats obtenus dans les séquences 1, 2, 6 et 7. Pour les échelons 3, 4 et 8 le programme n'est pas capable de trouver une bonne identification mais ne ressort pas le système inverse celui qui permet d'obtenir les propriétés physiques.

D'un autre côté, le programme Matlab diverge complètement dans l'itération au procès du Gauss-Seidel. Est pour cette raison qu'on n'a pas arrivé à trouver ses propriétés thermophysiques du Niobium. Ce problème persiste pour tous les échelons de bruit blanc effectués.

### 3.1.2 Expérience sur le barreau de Fer Pur

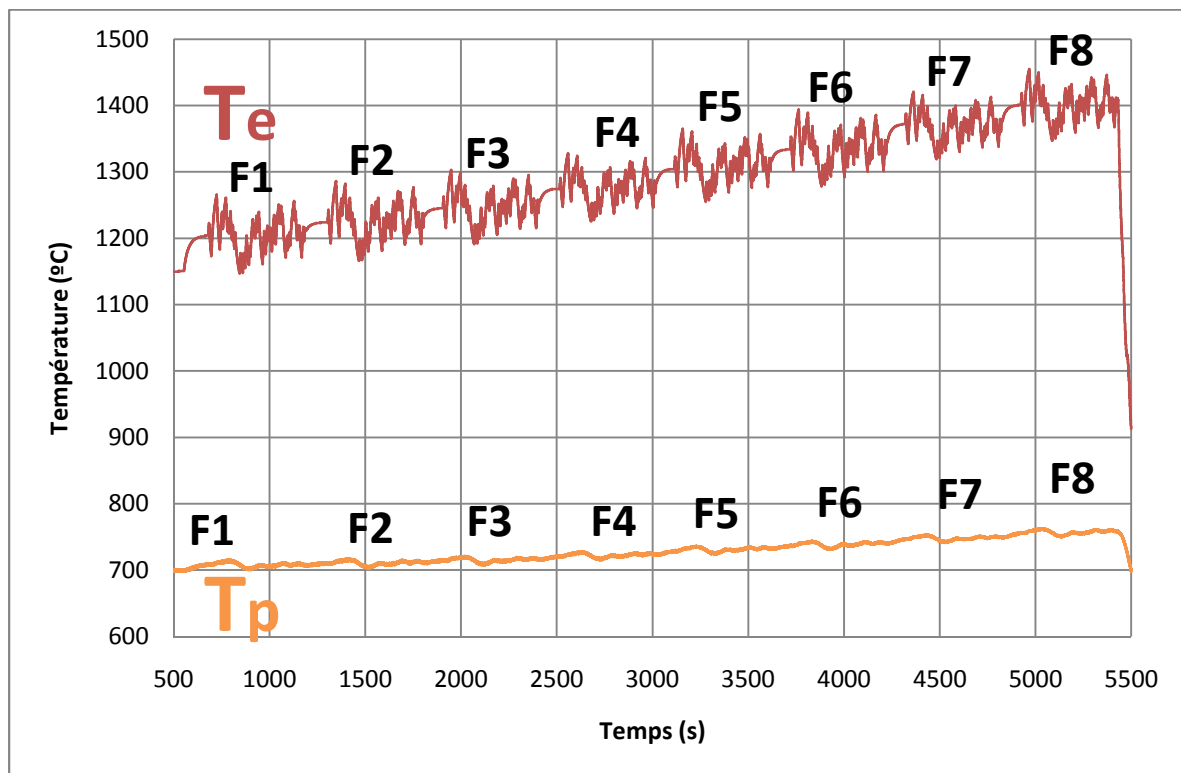


Figure 19. Evolution de  $T_e$  et  $T_p$  en barreau de Fer Pur en fonction du temps

On remarque qu'en raison de la faible conductivité thermique du Fer (Tableau 4), les variations de température polaire sont très faibles.

N° échelon	Amplitude du courant (A)	Amplitude de modulation (%)	$\bar{T}_e$ (°C)	$\bar{T}_p$ (°C)
1F	163	10	1204	707
2F	168	10	1224	711
3F	174	9	1245	714
4F	176	8	1274	720
5F	180	8	1304	728
6F	189	8	1334	736
7F	194	7	1372	745
8F	199	7	1401	755

**Tableau 9. Tableau des mesures moyennes relatives au Fer Pur**

Où:  $\bar{T}_{e,p} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} T_{e,p}(t) dt$  avec  $\Delta t$  la durée de la séquence étudiée.

L'étude des données du barreau de Fer Pur avec le programme Matlab, est montrée dans l'Annexe 5.

Pour le barreau de Fer Pur, l'identification trouvée dans de 4ème échelon montré antérieurement, a été très pareil à la trouvée dans le 3ème et 5ème. Pour les autres (1, 2, 6, 7 et 8) l'identification a résulté mauvais.

La raison de ce résultat dans la majorité des bruits blancs de l'expérience peut être la même que pour le barreau de Niobium. Dans le cas du Fer Pur, de plus, la baisse conductivité électrique ( $1.105 \cdot 10^{-7} (\Omega \cdot m)^{-1}$ ) est facteur à tenir en compte pour expliquer qu'on a moins résultats d'identification bons, puisque la température polaire change très peu pendant tout le bruit blanc. Ce petit changement a fait que le programme a eu plusieurs problèmes pour trouver la solution.

L'algorithme d'itération de Gauss-Seidel, comment avec le barreau de Niobium, diverge et les propriétés thermophysiques obtenues n'ont pas valeurs correctes dans aucun des paliers pour lesquels on a réalisé l'expérience. Est pour cela qu'on doit penser que la partie du programme Matlab qui correspond à l'étude des propriétés physiques a quelque problème qu'on n'a pas identifié pendant tout l'étude.

## 4 Analyse du programme Matlab

---

Pour analyser les données des mesures obtenues avec le programme ITheC du LabView, on a besoin d'un programme mathématique adapté élaboré avec le logiciel Matlab.

Ce programme a deux buts, le premier est l'obtention de l'identification (Valeurs de  $H_e$  et  $H_p$ ), et le deuxième est l'obtention des propriétés thermiques ( $s_e$ ,  $g_e$ ,  $h_{int}$ ,  $h_{ext}$ ,  $Bi$ ,  $C_p$ ) qui sont la vraie finalité de cette étude.

Le programme entier (Annexe 1) est composé pour 4 longs programmes et 4 plus petits qui réalisent actions complémentaires.

A grands traits, on peut décrire la fonction de chacun des grands programmes. Dans le programme appelé « import\_data\_lab » et « traitement\_exp » les données obtenues avec le LabView sont traitées et re-échantillonnées respectivement pour les utiliser avec les autres programmes. Dans « ident\_multi\_exp » on obtient les fonctions de transfert  $H_e$  et  $H_p$  (identification), et dans « traitement », on trouve l'inversion du modèle pour obtenir les propriétés thermiques avec une méthode itérative basée sur un algorithme de Gauss-Seidel.

Pour obtenir les résultats que l'on cherche, on a besoin de décrire certaines variables (dans l'annexe en couleur bleu):

- Naturellement, pour accéder au programme on a spécifié dans la *Fenêtre de Commandes (Command Window)* le nom de le fichier ou sont les données des mesures: «import\_lab\_data('date','heure','fichier de commande',pas de temps SBPA)»,  
pour exemple:  
« import\_lab\_data('2010\_12\_01','14h26min30s','cmd\_Niobium',4) ».
- De plus, on a besoin d'indiquer dans le programme « import\_data\_lab » le numéro d'échelon sur lequel on veut travailler (on décrit l'échelon comme un des paliers de courant pendant l'expérience), et la courbe de calibration qui est dépendante du matériau à étudier. Pour finaliser, il faut indiquer dans de programme « traitement\_exp » la résistance qui existe dans l'échantillon ( $R = \frac{P_0}{I_0^2}$ ) avec la température et courant comme variables à l'échelon indiqué. Où  $P_0 = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4)$  avec  $A$ =superficie de l'échantillon,  $\varepsilon = 0.25$ =émissivité,  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} Wm^{-2} K^{-4}$ =constante de Stefan-Boltzmann,  $T_0$ =température de l'environ,  $T$ =moitié des températures équatorial et polaire à le commencement de l'échelon.

Pascal Schetelat avait fait un programme pour traiter les données qui initialement ressemblé que marché bien parce que avec cela il trouvé des valeurs de les propriétés thermiques très

raisonnables (Utilisant les données de l'expérience faite par lui du 30-07-2009) [Annexe 6]. Pour confirmer que le programme fonctionne bien, on a refait l'expérience de Schetelat (même courant pour chauffer l'échantillon, même bruit blanc et même temps de l'expérience), mais le traitement de données n'était pas satisfaisant, les valeurs des propriétés thermiques ne sont pas retrouvées par l'algorithme de Gauss-Seidel.

## 5 Conclusions

---

Le but de ce travail à été avancé dans l'étude d'une nouvelle technique de connaitre les propriétés thermophysiques des métaux. Dans le cadre du travail réalisé pour moi, on peut dire que pendant ce temps j'ai bien appris les concepts qui m'ont permis comprendre tant le fonctionnement de la manip utilisé pour les expériences comme les principes physiques qui permettent réaliser cette étude.

Dans la manip, j'ai réalisé deux types d'expériences: les qui correspondent à obtenir la courbe d'étalonnage de chacune des barreaux et les qui correspondent à obtenir les séquences de bruit blanc dans différentes paliers pour étudier les propriétés physiques des matériaux.

L'expérience d'étalonnage du barreau de niobium et de fer pur a permis connaitre les équations de les respectives courbes d'étalonnage qui postérieurement sont utilisées dans le programme de LabView pour le adapter au matériel sur qui on travaille et obtenir les données de l'expérience. Remarquer que pour le barreau de niobium, à différence de l'étalonnage effectué par Pascal Schetelat, la courbe retrouvée a une tendance linéale.

Les expériences de réalisation de séquences de bruits blancs effectuées sur les deux barreaux permettront la continuation du projet sans la nécessité de ne réaliser aucune expérience sur ces deux métaux. Dans les deux, pendant tous les séquences les donnés obtenues sont satisfacteurs, sans aucun valeur anormale.

L'expérience avec le niobium et sa comparaison avec la réalisé par P. Schetelat a permis détecter problèmes dans le programme de Matlab qu'il avait utilisé. Quand j'ai essayé d'obtenir les résultats de ma expérience avec le programme Matlab de Schetelat, je noté qu'il n'avait aucun valeur valide à l'heure de réaliser l'algorithme de Gauss-Seidel pour trouver ses propriétés physiques. Avec l'aide et conseils de Jacqueline Etay j'ai développé depuis le principe les équations qui s'utilisent pour trouver l'identification (Annexe 2) et les utilisées dans l'algorithme de Gauss-Seidel (Annexe 3). Pour les équations de l'identification on arrivé à la conclusion que les utilisées par Schetelat ont été bien développées. Par autre coté, pour les équations d'itération du Gauss-Seidel on a trouvé d'autres équations différentes à les utilisées et rapportées dans l'article de Schetelat. Ainsi, les équations d'initialisation des variables et les équations par itérer dans le Gauss-Seidel ont été les changements plus importants qu'on a réalisé dans le programme Matlab. On doit dire que malgré qu'a été impossible trouver les propriétés physiques du niobium ou fer pur, le changement des équations à été bien justifié parce que on trouvé que les utilisées par Schetelat étaient trompées.

## 6 Perspectives

---

Malheureusement, les résultats obtenus par mon travail n'ont pas été satisfacteurs. L'impossibilité d'arriver à unes résultats numériques des propriétés physiques d'aucun des deux matériaux a fait que la continuation du projet passe par détecter les erreurs qu'encore il y a.

À mon avis, la continuation du projet a de commencer par étudier possibles erreurs dans les programmes de Matlab qui sont utilisés. Malgré les changements déjà effectués dans les programmes peut encore avoir d'autres problèmes qui n'ont été détectés.

Ensuite, une révision du programme LabView qui est utilisé est une bonne façon de continuer avec le projet. Les valeurs des données obtenues pour le barreau de niobium par Pascal Schetelat et moi (voir Annexe 8) sont trop différentes en tenant en compte que l'expérience est la même. Une mauvaise introduction de la courbe d'étalonnage correspondant à chacun des matériaux, ou un mauvais calibrage de la sonde Rogowski peut influencer à une mauvaise obtention des données de courant inducteur.

Les résultats du programme Matlab de l'expérience avec le barreau de fer pur ont été les peu satisfacteurs. Comme avec le barreau de niobium, avec le programme Matlab réalisé par moi les propriétés physiques n'ont pas été obtenues, mais le procès d'identification a été bon pour seulement 3 séquences. Une des possibles raisons pourquoi les résultats sont pires dans cet expérience peut être que dans l'expérience avec le fer pur il y avait un peu variation de la température polaire ( $T_p$ ). Peut être qu'avec un plus grand pas de temps de SBPA ( $t_s$ ), en maintenant la forme du bruit blanc, l'expérience apporte unes meilleurs résultats. Aussi intéressant est répéter les expériences avec d'autres matériaux avec une conductivité électrique plus haute (Pour éviter le problème de la température polaire qu'on a avait avec le fer pur).

Un autre possible problème que j'ai détecté est que le temps d'acquisition de données est très petit (1ms). Peut être intéressant répéter l'expérience avec un temps plus grand pour vérifier le comportement du programme Matlab avec ces changements.

Après résoudre les problèmes existants il faut rapporter la valeur de la capacité calorifique et conductivité thermique obtenue pour chaque séquence avec la courbe de référence donnée par Chase [1998] et Ho et al. [1972] respectivement (Figures 10 et 11 pour le niobium et Figures 12 et 13 pour le fer pur). Si les résultats obtenus sont similaires à la courbe de référence on peut affirmer que le modèle de projet est valide.



# Liste des figures

---

Figure 6. Electro Magnetic Levitator (EML)  
Figure 7. Manip disponible au laboratoire pour l'étude du projet ITheC  
Figure 8. Schéma de l'expérience  
Figure 9. Schéma circuit RLC  
Figure 10. Géométrie de l'inducteur  
Figure 6. Composants du circuit de vide  
Figure 7. Schéma de connexions de la manip  
Figure 8. Schéma de fonctionnement et disposition du Sonde Rogowski  
Figure 9. Capacité calorifique à pression constante du Niobium polycristallin Chase [1998]  
Figure 10. Conductivité thermique du Niobium polycristallin Ho et al. [1972]  
Figure 11. Courbe d'étalonnage du courant de pic  $I_0$  dans l'inducteur en fonction de la tension de consigne  $U_c$  avec le barreau de Niobium  
Figure 12. Capacité calorifique à pression constante du Fer Pur polycristallin Chase [1998]  
Figure 13. Conductivité thermique du Fer Pur Ho et al. [1972]  
Figure 14. Courbe d'étalonnage du courant de pic  $I_0$  dans l'inducteur en fonction de la tension de consigne  $U_c$  avec le barreau de Fer Pur  
Figure 15. Face avant du programme LabView "ITheC 3.0"  
Figure 16. Mesure de l'amplitude du courant inducteur avec le barreau de Niobium  
Figure 17. Mesure de l'amplitude du courant inducteur avec le barreau de Fer Pur  
Figure 18. Evolution de  $T_e$  et  $T_p$  en barreau de Niobium en fonction du temps  
Figure 19. Evolution de  $T_e$  et  $T_p$  en barreau de Fer Pur en fonction du temps

# Liste des tableaux

---

Tableau 3. Caractéristiques des cartes d'acquisition  
Tableau 4. Propriétés Niobium  
Tableau 3. Données obtenues pour l'étalonnage du Niobium  
Tableau 4. Propriétés Fer Pur  
Tableau 5. Données obtenues pour l'étalonnage du Fer Pur  
Tableau 6. Paramètres de la SBPA (temps total=500s) Niobium  
Tableau 7. Paramètres de la SBPA (temps total=500s) Fer Pur  
Tableau 8. Tableau des mesures moyennes relatives au Niobium  
Tableau 9. Tableau des mesures moyennes relatives au Fer Pur

## 7 Références bibliographiques

---

Costa, F.; Poulichet, P.

Sondes pour la mesure de courant en électronique de puissance

Les techniques de l'ingénieur, 2005, Référence D3085

Egry, I.; Diefenbach, A; Dreier, W. & Piller, J.

Containerless processing in space-thermophysical property measurements using electromagnetic levitation

Journal of Thermophysics, 2001, 22 (2) 569-578

Ernst, R.

Notions sur les aspects électriques des systèmes à induction monophasés

Cours de la formation industrielle INPG, 1996

Fecht, H. & Johnson, W.

A conceptual approach for non-contact calorimetry in space

Rev. Sci. Instr., 1991, 62, 1299-1303

Herlach, D.M.; Cochrane, R.F.; Egry, I.; Fecht H.J. & Greer A.L.

Containerless processing in the study of metallic melt and their solidification

Int. Mater. Rev., 1993, 38,273-347

Kraftmakher, Y.

Modulation calorimetry and related techniques

Physics Reports, 2002, 356, 1-117

Okress, E.C.; Wroughton, D.M.; Comenetz, G.; Brace, P.H. & Kelly

Electromagnetic levitation of solid and molten metals

Journal of applied physics, 1952, 23, 545-552

Richalet, J .

Pratique de l'Identification

Editions Hermès, 1991

Wunderlich, R. & Fecht, H.

Modulated electromagnetic induction calorimetry of reactive metallic liquids Measurement Science and Technology, 2005, 16, 402-416

Wunderlich, R.W.; Ettl, C. & Fecht, H.

Specific heat and thermal transport measurements of reactive Metallic Alloys by non contact calorimetry in reduced gravity.

International Journal of Thermophysics, 2001, 22, 579-591

Schetelat, P.; Etay, J.

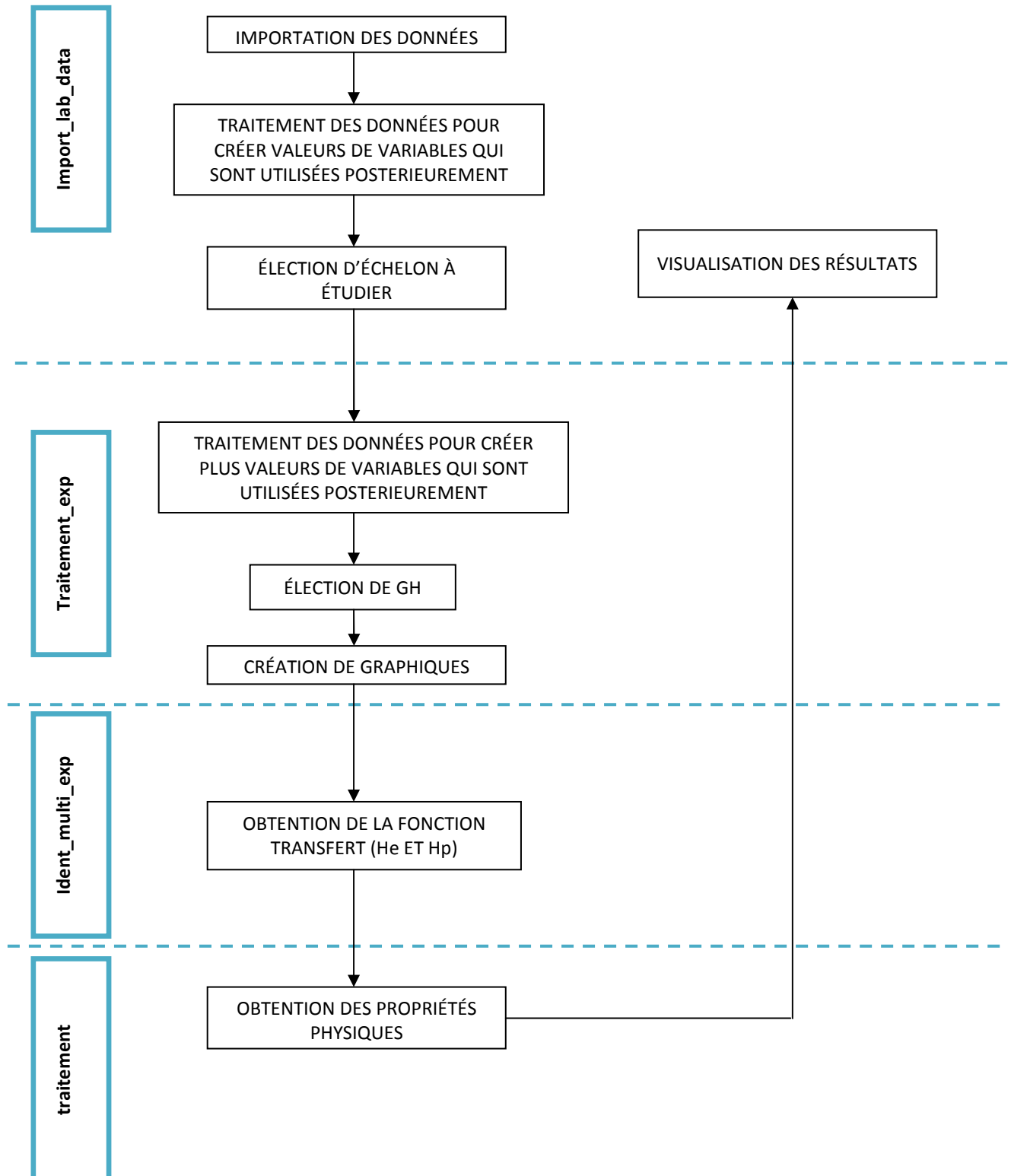
A new approach for non-contact calorimetry: system identification using pseudo-white noise perturbation.

Heat Mass Transfer, 2010, DOI 10.1007/s00231-010-0711-6

# Annexe 1

---

## Programmes Matlab utilisés



## Programme "import lab data"

```
function [DATA,Tr1,Tr2,cmd]=import_lab_data(date,heure,name_cmd,ts)

data=load([date,'/mesure_',heure,'.txt']);
% (charge les donnees de le fichier "mesures")

cmd=load([name_cmd,'.txt']);
% (charge le fichier du bruit blanc)

cmd=[0 cmd(1:end-1)];
% (addition d'une colonne avec un 0)

seq=1:length(data);
% (numeration de les lignes de donnees de le fichier "mesures")

DATA=data(seq,1:2:end)+1e-6*data(seq,2:2:end);
% (regroupement de les donnees quand le fichier "mesures" utilise virgule)

%DATA=data;
% (utiliser si le fichier avec les donnees utilise point)

Tsl=(DATA(end,1)-DATA(1,1))/length(DATA(:,1));
% (temps moyen d'acquisition de donnees)

T1=[DATA(:,1) DATA(:,5)];
T2=[DATA(:,1) DATA(:,6)];
% (creation de vecteur avec le temps et les temperatures de l'experience)

Icmd=[DATA(:,1) pi/2*(DATA(:,4)*283.25-14.25)];
%Niobium Marc
%Icmd=[DATA(:,1) pi/2*(DATA(:,4)*279.99-18.707)];
%Acier Inox Marc
%Icmd=[DATA(:,1) pi/2*(DATA(:,4).^2*120.67+DATA(:,4)*92.963+18.19)];
%Niobium Pascal
% (creation vecteur avec le temps et le courant theorique avec la courbe
d'etalonnage calibree)

Iexp=[DATA(:,1) DATA(:,2)];
% (creation vecteur avec le temps et le courant experimental)

[T1]=correct_T(T1,Tsl);
[T2]=correct_T(T2,Tsl);
% (vecteurs avec le temps et la temperature interpolees)

[t_start,t_end]=autoframe(date,heure);
% (apporte le temps ou commence et termine de TOUTS les bruits blanc
d'accord avec le fichier "commentaire")

for i=5
% (election de le bruit blanc ou on veut travailler)

[Tr1,Tr2,tI,Tid1,Tid2,param_phy,bps,aps,bes,aes,lambda_p,lambda_e]=traiteme
nt_exp(T1,T2,cmd,ts,t_start(i)+ts,t_end(i)+ts,Iexp);

    i
    aps
    aes
    bps
    bes

    se=param_phy(1)
    ge=param_phy(2)
    cp=param_phy(3)
    hr=param_phy(4)
    hc=param_phy(5)
```

```

        Bi=param_phy(6)

lambda_p

lambda_e
% (visualisation des resultats)

end

```

### Programme "traitement exp"

```

function
[Tr1,Tr2,tI,Tid1,Tid2,param_phy,bps,aps,bs,aes,lambda_p,lambda_e]=traiteme
nt_exp(T1,T2,cmd,ts,t_start,t_end,Iexp)

U1=find((T1(:,1)>=t_start)&(T1(:,1)<=t_end));
U2=find((T2(:,1)>=t_start)&(T2(:,1)<=t_end));
% (trouve le numero de lignes pour T1 et T2 pendant le bruit blanc a
etudier)

Ui=find((Iexp(:,1)>=t_start)&(Iexp(:,1)<=t_end));
% (trouve le numero de lignes pour le courant experimental pendant le bruit
blanc a etudier)

Tm1=mean(T1(U1,2));
Std1=std(T1(U1,2));

Tm2=mean(T2(U2,2));
Std2=std(T2(U2,2));
% (milieu et deviation standard de T1 et T2 pendant le bruit blanc)

T1=[T1(U1,1)-T1(U1(1),1) T1(U1,2)-T1(U1(1),2)];
T2=[T2(U2,1)-T2(U2(1),1) T2(U2,2)-T2(U2(1),2)];
% (difference de chaque ligne de temps et de temperatures T1 et T2 avec la
premiere ligne)

tI=T1(1,1):ts:T1(end,1);
% (vecteur avec une liste de numeros qui correspondent a le moment ou le
bruit blanc change de valeur d'accord avec ts)

[Tr1]=resampling(T1,tI);
[Tr2]=resampling(T2,tI);
% (interpolation pour trouver la difference de temperatures avec la
premiere ligne a le moment ou le bruit blanc change de valeur (a tout ts))

Ui0=find((Iexp(:,1)>=t_start-4)&(Iexp(:,1)<=t_start));
% (vecteur avec le temps et le courant des premiers 4 seconds de bruit
blanc)

I0=mean(Iexp(Ui0,2))
% (courant moyen pendant les premiers 4 seconds de bruit blanc)

[cmd]=modulation_puissance(cmd,Iexp(Ui,:),I0);
% (vecteur avec la valeur de betap positifs ou betam negatifs pour tout le
bruit blanc)

Gh=0.0046;
% (valeur resistance calcule a main)

[Hps,d2Yps,Hes,d2Yes,om,err_e,err_p,lambda_p,lambda_e,T_ps,T_es,bps,aps,bs
,aes]=ident_multi_exp(Tr2,Tr1,cmd*I0^2*Gh,4,4,5);

figure

```

```

hold on
plot(T1(:,1),T1(:,2),'r-',T2(:,1),T2(:,2),'b-
',tI,Tr1,'ro',tI,Tr2,'bo',tI,T_ps,'b<',tI,T_es,'r<')
legend('Temperature 1','Temperature 2','echantillonnage 1','echantillonnage
2','Location','Best')
stairs(tI,cmd*25,'k.-');
xlabel('temps (s)','FontSize',18)
ylabel('Temperature (K)','FontSize',18)
set(gca,'FontSize',16)

Tid1=T_es;
Tid2=T_ps;

[se,ge,cp,hr,hc,Bi]=traitement(aes,bes,aps,bps,ts);

param_phy=[se,ge,cp,hr,hc,Bi];
err_e
err_p

figure
loglog(om,abs(Hps),'b',om,abs(Hes),'r','LineWidth',1.5)
legend('Temperature 1','Temperature 2')
xlabel('\omega (rad.s^{-1})','FontSize',18)
ylabel('|H1(j\omega)|','FontSize',18)
set(gca,'FontSize',16)

figure
H_th=(268*67.3e-3*om).^(-1);
semilogx(om,abs(Hps)./H_th,'b',om,abs(Hes)./H_th,'r','LineWidth',1.5)
legend('Temperature 1','Temperature 2')
ylabel('|H_{e}(j\omega)|/|H_{C,0}|','FontSize',18)
xlabel('\omega (rad.s^{-1})','FontSize',18)
set(gca,'FontSize',16)

```

## **Programme "ident multi exp"**

```

function
[Hps,d2Yps,Hes,d2Yes,om,err_e,err_p,ap,ae,T_ps,T_es,bps,aps,bes,aes]=ident_
multi_exp(tps,tes,P,nb,na,it)

Ts=4;
% (pas de temps)

t=(0:length(tps)-1)*Ts;
% (vecteur avec les valeurs de temps ou le bruit blanc change de valeur
(chaque 4 seconds))

[bps,aps] = stmcb(tps,P,nb,na,it);
[bes,aes] = stmcb(tes,P,nb,na,it);
% (apporte les valeurs de bps, aps, bes, aes)

ap=(-log(roots(aps))/Ts).^(-1);
ae=(-log(roots(aes))/Ts).^(-1);
% (vecteurs de lambda_p et lambda_e)

abs(ap);
abs(ae);

T_es = filter(bes,aes,P);
T_ps = filter(bps,aps,P);
% (fluctuation de temperatures en rapport a la temperature moyen)

```

```

om=10.^(-4:0.01:log10((Ts/2)^(-1)));
Hps=freqz(bps,aps,om*Ts);
Hes=freqz(bes,aes,om*Ts);
% (transfer function)

X=log(om);
% (logarithme naturel d'om)

Yps=log(abs(Hps));
Yes=log(abs(Hps));

d2Yes=(Yes(1:end-2)-2*Yes(2:end-1)+Yes(3:end))./(X(2:end-1)-X(1:end-2)).^2;
d2Yps=(Yps(1:end-2)-2*Yps(2:end-1)+Yps(3:end))./(X(2:end-1)-X(1:end-2)).^2;

err_e=std(T_es-tes)/std(tes)*100;
err_p=std(T_ps-tps)/std(tps)*100;
% (erreur au resultats)

```

### Programme "traitement"

```

function [se,ge,cp,hr,hc,Bi]=traitement(Ae,Be,Ap,Bp,Ts)

a=-log(roots(Ap))/Ts;

l_r=a(end-1);
l_c=a(end);
% (valeurs propres des fonctions transfert)

[He,w]=freqz(Be,Ae,100000);
% (He vecteur avec 100000 valeurs complexes (3eme et 4eme quadrant de
circonference) et w valeurs reels de 0 a pi)

w0=sqrt(l_r*l_c);
w1=find(w>w0-0.001 & w<w0+0.001,1);
He_w=He(w1);

[Hp_0]=freqz(Bp,Ap,[0 0]);
Hp_0=Hp_0(1);
% (valeur initial de Hp)

%=====
S1=(Be(1)/Bp(1))-1
S2=1/(real(He_w)*(l_r+l_c))
S3=l_r+l_c
S4=Hp_0*l_r*l_c
S5=l_r*l_c

se=0.5
ge=0.5
Bi=S1/(1-se)
cp=S2/ge
hc=(S3*cp*(1-ge)*ge-1)/(1+Bi)
hr=hc*Bi

% (initialisation Gauss-Seidel)

for i=1:20

    Bi(i+1)=S1/(1-se(i))
    cp(i+1)=S2/ge(i)
    hc(i+1)=(S3*cp(i+1)*(1-ge(i))*ge(i)-1)/(1+Bi(i+1))
    hr(i+1)=hc(i+1)*Bi(i+1)
    ge(i+1)=hc(i+1)/(S4*cp(i+1)^2*(1-ge(i)))

```

```

        se(i+1)=(S5*(cp(i+1)^2*(1-ge(i+1))*ge(i+1))/(hc(i+1)*Bi(i+1)*(1-
se(i)))-(1+se(i)*Bi(i+1))*hc(i+1))*(1-se(i))
end

        ge=ge(end);
        se=se(end);
        hr=hr(end);
        hc=hc(end);
        Bi=Bi(end);
        cp=cp(end);
% (Gauss-Seidel)

```

### **Programme "autoframe"**

```

function [t_start,t_end]=autoframe(date,heure)

fid=fopen([date,'/Commentaire_',heure,'.txt'],'r');
C= fread(fid, '*char')';
fclose(fid);

C = regexprep(C, ',', '.');

cstart=findstr(C,'#t_start');

cend=findstr(C,'#t_end');

cs=findstr(C,'s#');

for i= 1: length(cend)

    [I]=find((cend(i)-cstart)>0);
    [a,II]=min((cend(i)-cstart(I)));

    j=(2*i-1)+length(I)-i;

    t_start(i)=str2num(C(cstart(I(II))+9:cs(j)-1));
    t_end(i) =str2num(C(cend(i) +7:cs(j+1) -1));

end
% (apporte le temps ou commence et termine de TOUTS les bruits blanc
d'accord avec le fichier "commentaire")

```

### **Programme "correct T"**

```

function [Tc]=correct_T(T,Ts1)

I=find(T(:,2)>0);
% (recherche les numeros de ligne ou tous les valeurs de temperature sont
positifs)

II=find(T(I(2:end),2)-T(I(1:end-1),2));
% (recherche les numeros de ligne ou il y a changement de temperature)

Tc=0.5*(T(I(II),:)+T(I(II+1),:));
% (valeur moyen de temps et temperature entre les lignes consecutives de T1
et T2 qui acquittent les deux conditions anterieurs)

ttmp=T(1,1):Ts1:T(end,1);

```



```
% (vecteur de temps avec le pas egal a Ts1 puis le premier valeur au
dernier valeur de T1 et T2 (sans les conditions anterieurs))

Ttmp=interp1(Tc(:,1),Tc(:,2),ttmp');
% (vecteur de temperature interpolant avec: le pas de temps de le fichier
de donnees, le pas de temps Ts1 et les temperatures "valides" Tc)

Tc=[ttmp' Ttmp];
% (vecteur avec le temps et la temperature interpolees)
```

### **Programme "resampling"**

```
function [Tr]=resampling(T,tI)

Tr=interp1(T(:,1),T(:,2),tI);
% (interpolation pour trouver la difference de temperatures avec la
premiere ligne a le moment ou le bruit blanc change de valeur (a tout ts))
```

### **Programme "modulation puissance"**

```
function [Pcmd]=modulation_puissance(cmd,Iexp,I0)

[N,X]=hist(Iexp(:,2),51);
% (trouve 2 vecteurs: N est le numero de fois que apparait X sous un total
de 51 valeurs)

[vm,Km]=max(N(1:25));
% (apporte les temps et la position plus repetes de la premiere moitie de
l'histogramme anterieur)

[vp,Kp]=max(N(26:end));
% (apporte les temps et la position plus repetes de la deuxieme moitie de
l'histogramme anterieur)

Im=X(Km);
% (valeur de la intensite corresponent a la position plus repete de la
premiere moitie de l'histogramme anterieur)

X=X(26:end);
% (vecteur avec les intensites de la deuxieme moitie de l'histogramme
anterieur)

Ip=X(Kp);
% (valeur de la intensite corresponent a la position plus repete de la
deuxieme moitie de l'histogramme anterieur)

betap=(Ip^2-I0^2)/I0^2;
betam=(I0^2-Im^2)/I0^2;
% (proportion de deviation au carre de Ip et Im vers Io)

I=find(cmd==1);
% (vecteur avec les valeurs egal a 1 a le bruit blanc)
% (vecteur avec les valeurs egal a -1 a le bruit blanc)

Pcmd(I)=cmd(I)*betap;
I=find(cmd==-1);
Pcmd(I)=cmd(I)*betam;
% (vecteur avec le valeur de betap positifs ou betam negatifs pour tout le
bruit blanc)
```



## Annexe 2

---

# Transformation de Laplace du système reliant les variations de température aux variations temporelles de puissances – Calcul des fonctions transferts analytiques

On part du système d'équations:

$$C_p g_e \frac{d\tilde{T}_e}{dt} = h_{int} [\tilde{T}_p - (1 + s_e Bi) \tilde{T}_e] + \tilde{P} \quad (1.a)$$

$$C_p (1 - g_e) \frac{d\tilde{T}_p}{dt} = h_{int} [\tilde{T}_e - (1 + (1 - s_e) Bi) \tilde{T}_p] \quad (1.b)$$

On applique une transformation de Laplace au système (1):

$$C_p g_e \mathcal{L}\left(\frac{d\tilde{T}_e}{dt}\right) = h_{int} [\mathcal{L}(\tilde{T}_p) - (1 + s_e Bi) \cdot \mathcal{L}(\tilde{T}_e)] + \mathcal{L}(\tilde{P}) \quad (2.a)$$

$$C_p (1 - g_e) \mathcal{L}\left(\frac{d\tilde{T}_p}{dt}\right) = h_{int} [\mathcal{L}(\tilde{T}_e) - (1 + (1 - s_e) Bi) \cdot \mathcal{L}(\tilde{T}_p)] \quad (2.b)$$

On applique la définition suivante:

$$\boxed{\mathcal{L}(F'(t)) = p \cdot f(p) - F(0)}$$

$$C_p g_e (p \cdot \mathcal{L}(\tilde{T}_e) - \tilde{T}_e(0)) = h_{int} [\mathcal{L}(\tilde{T}_p) - (1 + s_e Bi) \cdot \mathcal{L}(\tilde{T}_e)] + \mathcal{L}(\tilde{P}) \quad (3.a)$$

$$C_p(1-g_e)(p \cdot \mathcal{L}(\tilde{T}_p) - \tilde{T}_p(0)) = h_{int} [\mathcal{L}(\tilde{T}_e) - (1 + (1-s_e)Bi) \cdot \mathcal{L}(\tilde{T}_p)] \quad (3.b)$$

On divise par  $\mathcal{L}(\tilde{P})$ :

$$C_p g_e \left( p \cdot \frac{\mathcal{L}(\tilde{T}_e)}{\mathcal{L}(\tilde{P})} - \frac{\tilde{T}_e(0)}{\mathcal{L}(\tilde{P})} \right) = h_{int} \left[ \frac{\mathcal{L}(\tilde{T}_p)}{\mathcal{L}(\tilde{P})} - (1 + s_e Bi) \cdot \frac{\mathcal{L}(\tilde{T}_e)}{\mathcal{L}(\tilde{P})} \right] + 1 \quad (4.a)$$

$$C_p(1-g_e) \left( p \cdot \frac{\mathcal{L}(\tilde{T}_p)}{\mathcal{L}(\tilde{P})} - \frac{\tilde{T}_p(0)}{\mathcal{L}(\tilde{P})} \right) = h_{int} \left[ \frac{\mathcal{L}(\tilde{T}_e)}{\mathcal{L}(\tilde{P})} - (1 + (1-s_e)Bi) \cdot \frac{\mathcal{L}(\tilde{T}_p)}{\mathcal{L}(\tilde{P})} \right] \quad (4.b)$$

On suppose que  $\tilde{T}_p(0) = \tilde{T}_e(0) = 0$ :

$$C_p g_e \cdot p \cdot \frac{\mathcal{L}(\tilde{T}_e)}{\mathcal{L}(\tilde{P})} = h_{int} \left[ \frac{\mathcal{L}(\tilde{T}_p)}{\mathcal{L}(\tilde{P})} - (1 + s_e Bi) \cdot \frac{\mathcal{L}(\tilde{T}_e)}{\mathcal{L}(\tilde{P})} \right] + 1 \quad (4.a)$$

$$C_p(1-g_e) \cdot p \cdot \frac{\mathcal{L}(\tilde{T}_p)}{\mathcal{L}(\tilde{P})} = h_{int} \left[ \frac{\mathcal{L}(\tilde{T}_e)}{\mathcal{L}(\tilde{P})} - (1 + (1-s_e)Bi) \cdot \frac{\mathcal{L}(\tilde{T}_p)}{\mathcal{L}(\tilde{P})} \right] \quad (4.b)$$

On introduit dans les équations 4.a et 4.b les définitions des fonctions de transfert:

$$H_p^{ana}(p) = \frac{\mathcal{L}\{\tilde{T}_p\}}{\mathcal{L}\{\tilde{P}\}} \quad (5.a)$$

$$H_e^{ana}(p) = \frac{\mathcal{L}\{\tilde{T}_e\}}{\mathcal{L}\{\tilde{P}\}} \quad (5.b)$$

$$C_p g_e \cdot p \cdot H_e^{ana}(p) = h_{int} [H_p^{ana}(p) - (1 + s_e Bi) \cdot H_e^{ana}(p)] + 1 \quad (6.a)$$

$$C_p(1-g_e) \cdot p \cdot H_p^{ana}(p) = h_{int} [H_e^{ana}(p) - (1 + (1-s_e)Bi) \cdot H_p^{ana}(p)] \quad (6.b)$$

On réorganise ces équations:

$$h_{int} \cdot H_p^{ana}(p) - (C_p g_e \cdot p + h_{int} \cdot (1 + s_e Bi)) \cdot H_e^{ana}(p) = -1 \quad (7.a)$$

$$\left(C_p(1-g_e) \cdot p + h_{int} \cdot (1+(1-s_e)Bi)\right) \cdot H_p^{ana}(p) - h_{int} \cdot H_e^{ana}(p) = 0 \quad (7.b)$$

On divise par  $h_{int}$  (mais on peut aussi éviter cette étape):

$$H_p^{ana}(p) - \left(\frac{C_p g_e}{h_{int}} \cdot p + (1+s_e Bi)\right) \cdot H_e^{ana}(p) = -\frac{1}{h_{int}} \quad (8.a)$$

$$\left(\frac{C_p(1-g_e)}{h_{int}} \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)\right) \cdot H_p^{ana}(p) - H_e^{ana}(p) = 0 \quad (8.b)$$

On multiplie la première équation par  $\left(\frac{C_p(1-g_e)}{h_{int}} \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)\right)$ :

$$\begin{aligned} &\left(\frac{C_p(1-g_e)}{h_{int}} \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)\right) \cdot H_p^{ana}(p) \\ &- \left(\frac{C_p(1-g_e)}{h_{int}} \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)\right) \left(\frac{C_p g_e}{h_{int}} \cdot p + (1+s_e Bi)\right) \cdot H_e^{ana}(p) \end{aligned} \quad (9.a)$$

$$= -\frac{1}{h_{int}} \left(\frac{C_p(1-g_e)}{h_{int}} \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)\right) \left(\frac{C_p(1-g_e)}{h_{int}} \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)\right) \cdot H_p^{ana}(p) - H_e^{ana}(p) = 0 \quad (9.b)$$

On soustrait les 2 équations:

$$\left(\frac{C_p(1-g_e)}{h_{int}} \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)\right) \left(\frac{C_p g_e}{h_{int}} \cdot p + (1+s_e Bi)\right) \cdot H_e^{ana}(p) - H_e^{ana}(p) = \frac{1}{h_{int}} \left(\frac{C_p(1-g_e)}{h_{int}} \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)\right) \left(\frac{C_p(1-g_e)}{h_{int}} \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)\right) \cdot H_p^{ana}(p)$$

$$\left(\left(\frac{C_p(1-g_e)}{h_{int}} \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)\right) \left(\frac{C_p g_e}{h_{int}} \cdot p + (1+s_e Bi)\right) - 1\right) \cdot H_e^{ana}(p) = \frac{1}{h_{int}} \left(\frac{C_p(1-g_e)}{h_{int}} \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)\right) \left(\frac{C_p(1-g_e)}{h_{int}} \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)\right) \cdot H_p^{ana}(p)$$

$$\left((C_p(1-g_e) \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)h_{int}) \left(C_p g_e \cdot p + (1+s_e Bi)h_{int}\right) - h_{int}\right) \cdot H_e^{ana}(p) = (C_p(1-g_e) \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)h_{int}) \left(C_p(1-g_e) \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)h_{int}\right) \cdot H_p^{ana}(p)$$

$$H_e^{ana}(p) = \frac{C_p(1-g_e) \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)h_{int}}{(C_p(1-g_e) \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)h_{int}) \left(C_p g_e \cdot p + (1+s_e Bi)h_{int}\right) - h_{int}} \cdot H_p^{ana}(p)$$

On multiplie la 2<sup>e</sup> équation par  $\left(\frac{C_p g_e}{h_{int}} \cdot p + (1+s_e Bi)\right)$ :

$$\left( \frac{C_p(1-g_e)}{h_{int}} \cdot p + (1+(1-s_e)Bi) \right) \cdot \left( \frac{C_p g_e}{h_{int}} \cdot p + (1+s_e Bi) \right) H_p^{ana}(p) - \left( \frac{C_p g_e}{h_{int}} \cdot p + (1+s_e Bi) \right) H_e^{ana}(p) = 0 \quad (10a)$$

$$H_p^{ana}(p) - \left( \frac{C_p g_e}{h_{int}} \cdot p + (1+s_e Bi) \right) \cdot H_e^{ana}(p) = -\frac{1}{h_{int}} \quad (10.b)$$

On soustrait les 2 équations:

$$\left( \left( \frac{C_p(1-g_e)}{h_{int}} \cdot p + (1+(1-s_e)Bi) \right) \cdot \left( \frac{C_p g_e}{h_{int}} \cdot p + (1+s_e Bi) \right) - 1 \right) H_p^{ana}(p) = +\frac{1}{h_{int}}$$

$$\left( (C_p(1-g_e) \cdot p + (1+(1-s_e)Bi \cdot h_{int})) \cdot \left( \frac{C_p g_e}{h_{int}} \cdot p + (1+s_e Bi) \right) - 1 \right) H_p^{ana}(p) = +1$$

$$H_p^{ana}(p) = \frac{h_{int}}{(C_p(1-g_e) \cdot p + (1+(1-s_e)Bi \cdot h_{int})) \cdot (C_p g_e \cdot p + (1+s_e Bi)h_{int}) - h_{int}}$$

D'où les fonctions de transfert suivante:

$$H_p^{ana}(p) = \frac{h_{int}}{(C_p(1-g_e) \cdot p + (1+(1-s_e)Bi \cdot h_{int})) \cdot (C_p g_e \cdot p + (1+s_e Bi)h_{int}) - h_{int}}$$

$$H_e^{ana}(p) = \frac{C_p(1-g_e) \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)h_{int}}{(C_p(1-g_e) \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)h_{int}) \cdot (C_p g_e \cdot p + (1+s_e Bi)h_{int}) - h_{int}}$$

Ces fonctions ont le même dénominateur, qui peut aussi se mettre sous la forme:

$$(C_p(1-g_e) \cdot p + (1+(1-s_e)Bi \cdot h_{int})) \cdot (C_p g_e \cdot p + (1+s_e Bi)h_{int}) - h_{int} =$$

$$(C_p^2(1-g_e)g_e) \left( \left( p + \frac{(1+(1-s_e)Bi \cdot h_{int})}{C_p(1-g_e)} \right) \cdot \left( p + \frac{(1+s_e Bi)h_{int}}{C_p g_e} \right) - \frac{h_{int}}{C_p^2(1-g_e)g_e} \right)$$

Or par définition de  $\lambda_{ext}$  et  $\lambda_{int}$ , on écrit:

$$\left( p + \frac{(1+(1-s_e)Bi \cdot h_{int})}{C_p(1-g_e)} \right) \cdot \left( p + \frac{(1+s_e Bi)h_{int}}{C_p g_e} \right) - \frac{h_{int}}{C_p^2(1-g_e)g_e} = (p + \lambda_{ext}) \cdot (p + \lambda_{int})$$

Les fonctions de transfert peuvent donc s'écrire sous la forme:

$$H_p^{ana}(p) = \frac{h_{int}}{\left(C_p^2(1-g_e)g_e\right)(p+\lambda_{ext}) \cdot (p+\lambda_{int})}$$

$$H_e^{ana}(p) = \frac{C_p(1-g_e) \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)h_{int}}{\left(C_p^2(1-g_e)g_e\right)(p+\lambda_{ext}) \cdot (p+\lambda_{int})}$$

Finalement, on peut dire que:

$$H_p^{ana}(p) = \frac{L\{\tilde{T}_p\}}{L\{\tilde{P}\}} = \frac{h_{int}}{C_p^2 g_e (1-g_e)} \frac{1}{(p+\lambda_{int})(p+\lambda_{ext})} \quad (12.a)$$

$$H_e^{ana}(p) = \frac{L\{\tilde{T}_e\}}{L\{\tilde{P}\}} = \frac{h_{int}}{C_p^2 g_e (1-g_e)} \frac{1 + (1-se)Bi + p \frac{(1-g_e)C_p}{h_{int}}}{(p+\lambda_{int})(p+\lambda_{ext})} \quad (12.b)$$

## Annexe 3

### Equations pour l'identification

Il faut rechercher du système à résoudre par une méthode de Gauss-Seidel. On a:

$$H_p^{\exp}(e^{-pt_s}) = \frac{b_{p,0} + b_{p,1} \cdot e^{-pt_s} + b_{p,2} \cdot e^{-2pt_s} + b_{p,3} \cdot e^{-3pt_s} + b_{p,4} \cdot e^{-4pt_s}}{1 + a_{p,1} \cdot e^{-pt_s} + a_{p,2} \cdot e^{-2pt_s} + a_{p,3} \cdot e^{-3pt_s} + a_{p,4} \cdot e^{-4pt_s}}$$
$$H_e^{\exp}(e^{-pt_s}) = \frac{b_{e,0} + b_{e,1} \cdot e^{-pt_s} + b_{e,2} \cdot e^{-2pt_s} + b_{e,3} \cdot e^{-3pt_s} + b_{e,4} \cdot e^{-4pt_s}}{1 + a_{e,1} \cdot e^{-pt_s} + a_{e,2} \cdot e^{-2pt_s} + a_{e,3} \cdot e^{-3pt_s} + a_{e,4} \cdot e^{-4pt_s}}$$

Avec:

$$1 + a_{p,1} \cdot e^{-pt_s} + a_{p,2} \cdot e^{-2pt_s} + a_{p,3} \cdot e^{-3pt_s} + a_{p,4} \cdot e^{-4pt_s} = 1 + a_{e,1} \cdot e^{-pt_s} + a_{e,2} \cdot e^{-2pt_s} + a_{e,3} \cdot e^{-3pt_s} + a_{e,4} \cdot e^{-4pt_s}$$
$$= \frac{(p + \lambda_{ext}) \cdot (p + \lambda_{int})}{\lambda_{int} \cdot \lambda_{ext}} = \frac{1}{\lambda_{int} \cdot \lambda_{ext}} p^2 + p \cdot \frac{\lambda_{ext} + \lambda_{int}}{\lambda_{int} \cdot \lambda_{ext}} + 1$$

D'autre part, on choisit le modèle le plus simple:

$$H_p^{ana}(p) = \frac{h_{int}}{(C_p^2(1 - g_e)g_e)(p + \lambda_{ext}) \cdot (p + \lambda_{int})}$$
$$H_e^{ana}(p) = \frac{C_p(1 - g_e) \cdot p + (1 + (1 - s_e)Bi)h_{int}}{(C_p^2(1 - g_e)g_e)(p + \lambda_{ext}) \cdot (p + \lambda_{int})}$$

Pour égaliser les fonctions de transfert issues des expériences et analytiques:

$$H_p^{\exp}(e^{-pt_s}) = \frac{h_{int}}{(C_p^2(1 - g_e)g_e)(p + \lambda_{ext}) \cdot (p + \lambda_{int})}$$
$$H_e^{\exp}(e^{-pt_s}) = \frac{C_p(1 - g_e) \cdot p + (1 + (1 - s_e)Bi)h_{int}}{(C_p^2(1 - g_e)g_e)(p + \lambda_{ext}) \cdot (p + \lambda_{int})}$$

Où  $p$  est complexe.

On fait le rapport des fonctions de transfert :



$$\frac{H_e^{\text{exp}}(e^{-pt_s})}{H_p^{\text{exp}}(e^{-pt_s})} = \frac{C_p(1-g_e) \cdot p + (1+(1-s_e)Bi)h_{\text{int}}}{h_{\text{int}}}$$

$$\frac{H_e^{\text{exp}}(e^{-pt_s})}{H_p^{\text{exp}}(e^{-pt_s})} = \frac{C_p(1-g_e) \cdot p}{h_{\text{int}}} + (1+(1-s_e)Bi)$$

$$\frac{b_{e,0} + b_{e,1} \cdot e^{-pt_s} + b_{e,2} \cdot e^{-2pt_s} + b_{e,3} \cdot e^{-3pt_s} + b_{e,4} \cdot e^{-4pt_s}}{b_{p,0} + b_{p,1} \cdot e^{-pt_s} + b_{p,2} \cdot e^{-2pt_s} + b_{p,3} \cdot e^{-3pt_s} + b_{p,4} \cdot e^{-4pt_s}} = \frac{C_p(1-g_e) \cdot p}{h_{\text{int}}} + (1+(1-s_e)Bi)$$

$$b_{e,0} + b_{e,1} \cdot e^{-pt_s} + b_{e,2} \cdot e^{-2pt_s} + \dots = \left( \frac{C_p(1-g_e) \cdot p}{h_{\text{int}}} + (1+(1-s_e)Bi) \right) \cdot (b_{p,0} + b_{p,1} \cdot e^{-pt_s} + b_{p,2} \cdot e^{-2pt_s} + \dots)$$

$$b_{e,0} + b_{e,1} \cdot e^{-pt_s} + b_{e,2} \cdot e^{-2pt_s} + \dots = (1+(1-s_e)Bi) \cdot (b_{p,0} + b_{p,1} \cdot e^{-pt_s} + b_{p,2} \cdot e^{-2pt_s}) + \frac{C_p(1-g_e) \cdot p}{h_{\text{int}}} \cdot (b_{p,0} + b_{p,1} \cdot e^{-pt_s} + b_{p,2} \cdot e^{-2pt_s} + \dots)$$

On égale les termes indépendants de  $p$ :

$$b_{e,0} = b_{p,0} \cdot (1+(1-s_e)Bi) \text{ Ou bien } \boxed{\frac{b_{e,0}}{b_{p,0}} - 1 = (1-s_e)Bi}$$

$$\begin{aligned} & b_{e,1} \cdot e^{-pt_s} + b_{e,2} \cdot e^{-2pt_s} + b_{e,3} \cdot e^{-3pt_s} + b_{e,4} \cdot e^{-4pt_s} \\ &= (1+(1-s_e)Bi) \cdot (b_{p,1} \cdot e^{-pt_s} + b_{p,2} \cdot e^{-2pt_s}) + \frac{C_p(1-g_e) \cdot p}{h_{\text{int}}} \cdot (b_{p,0} + b_{p,1} \cdot e^{-pt_s} + b_{p,2} \cdot e^{-2pt_s} + b_{p,3} \cdot e^{-3pt_s} + b_{p,4} \cdot e^{-4pt_s}) \end{aligned}$$

Remarque pour  $p = 0$  :

$$b_{e,1} + b_{e,2} + b_{e,3} + b_{e,4} = (1+(1-s_e)Bi) \cdot (b_{p,1} + b_{p,2} + b_{p,3} + b_{p,4}) \text{ Ou bien}$$

$$\frac{b_{e,1} + b_{e,2} + b_{e,3} + b_{e,4}}{b_{p,1} + b_{p,2} + b_{p,3} + b_{p,4}} - 1 = (1-s_e)Bi$$

On vérifie que

$$\frac{b_{e,1} + b_{e,2} + b_{e,3} + b_{e,4}}{b_{p,1} + b_{p,2} + b_{p,3} + b_{p,4}} = \frac{b_{e,0}}{b_{p,0}}$$

D'autre part, par définition on a:

$$\left( p + \frac{(1+(1-s_e)Bi) \cdot h_{\text{int}}}{C_p(1-g_e)} \right) \cdot \left( p + \frac{(1+s_eBi)h_{\text{int}}}{C_p g_e} \right) - \frac{h_{\text{int}}}{C_p^2(1-g_e)g_e} = (p + \lambda_{\text{ext}}) \cdot (p + \lambda_{\text{int}})$$

$$p^2 + p \cdot \left( \frac{(1+s_e Bi)h_{int}}{C_p g_e} + \frac{(1+(1-s_e)Bi \cdot h_{int})}{C_p(1-g_e)} \right) + \frac{(1+(1-s_e)Bi \cdot h_{int})}{C_p(1-g_e)} \cdot \frac{(1+s_e Bi)h_{int}}{C_p g_e} - \frac{h_{int}}{C_p^2(1-g_e)g_e}$$

$$= p^2 + p \cdot (\lambda_{ext} + \lambda_{int}) + \lambda_{ext} \cdot \lambda_{int}$$

$$p^2 + p \cdot \left( \frac{(1+s_e Bi)h_{int}}{C_p g_e} + \frac{(1+(1-s_e)Bi \cdot h_{int})}{C_p(1-g_e)} \right) + \frac{(1+(1-s_e)Bi \cdot h_{int})}{C_p(1-g_e)} \cdot \frac{(1+s_e Bi)h_{int}}{C_p g_e} - \frac{h_{int}}{C_p^2(1-g_e)g_e}$$

$$= p^2 + p \cdot (\lambda_{ext} + \lambda_{int}) + \lambda_{ext} \cdot \lambda_{int}$$

$$\lambda_{ext} + \lambda_{int} = \frac{1}{C_p} \left( \frac{(1+s_e Bi)h_{int}}{g_e} + \frac{(1+(1-s_e)Bi \cdot h_{int})}{(1-g_e)} \right)$$

Et

$$\lambda_{ext} \cdot \lambda_{int} = \frac{(1+(1-s_e)Bi \cdot h_{int})}{C_p(1-g_e)} \cdot \frac{(1+s_e Bi)h_{int}}{C_p g_e} - \frac{h_{int}}{C_p^2(1-g_e)g_e}$$

On égale terme à terme:

$$\lambda_{ext} + \lambda_{int} = \frac{1}{C_p} \left( \frac{(1+s_e Bi)h_{int}}{g_e} + \frac{(1+(1-s_e)Bi \cdot h_{int})}{(1-g_e)} \right)$$

$$\lambda_{ext} \cdot \lambda_{int} = \frac{h_{int} \cdot Bi \cdot (1-s_e)}{C_p^2(1-g_e)g_e} \left( \frac{s_e}{1-s_e} + (1+s_e Bi) \cdot h_{int} \right)$$

$$\frac{b_{e,0}}{b_{p,0}} - 1 = (1-s_e)Bi$$

On a 3 équations pour 5 inconnues

On y ajoute:

$$C_p g_e = \frac{1}{\text{Re}(H_e^{\exp}(e^{-j\omega_o t_s})) \cdot (\lambda_{int} + \lambda_{ext})} \quad (p = j\omega_o)$$

$$H_p^{\exp}(1) = \frac{h_{int}}{(C_p^2(1-g_e)g_e)\omega_o^2} \quad (p = 0)$$

Système à résoudre:

$$\left\{ \begin{array}{l} (1-s_e)Bi = \frac{b_{e,0}}{b_{p,0}} - 1 \\ C_p g_e = \frac{1}{\text{Re}(H_e^{\text{exp}}(e^{-j\omega_o t_s})) \cdot (\lambda_{\text{int}} + \lambda_{\text{ext}})} \\ \frac{1}{C_p} \left( \frac{(1+s_e Bi)h_{\text{int}}}{g_e} + \frac{(1+(1-s_e)Bi \cdot h_{\text{int}})}{(1-g_e)} \right) = \lambda_{\text{ext}} + \lambda_{\text{int}} \\ \frac{h_{\text{int}}}{(C_p^2(1-g_e)g_e)} = H_p^{\text{exp}}(1) \cdot \lambda_{\text{ext}} \cdot \lambda_{\text{int}} \\ \frac{h_{\text{int}} \cdot Bi \cdot (1-s_e)}{C_p^2(1-g_e)g_e} \left( \frac{s_e}{1-s_e} + (1+s_e Bi) \cdot h_{\text{int}} \right) = \lambda_{\text{ext}} \cdot \lambda_{\text{int}} \end{array} \right.$$

On appelle:

$$\left\{ \begin{array}{l} S1 = \frac{b_{e,0}}{b_{p,0}} - 1 \\ S2 = \frac{1}{\text{Re}(H_e^{\text{exp}}(e^{-j\omega_o t_s})) \cdot (\lambda_{\text{int}} + \lambda_{\text{ext}})} \\ S3 = \lambda_{\text{ext}} + \lambda_{\text{int}} \\ S4 = H_p^{\text{exp}}(1) \cdot \lambda_{\text{ext}} \cdot \lambda_{\text{int}} \\ S5 = \lambda_{\text{ext}} \cdot \lambda_{\text{int}} \end{array} \right.$$

$$(1-s_e)Bi = S1$$

$$C_p g_e = S2$$

$$\frac{1}{C_p} \left( \frac{(1+s_e Bi)h_{\text{int}}}{g_e} + \frac{(1+(1-s_e)Bi \cdot h_{\text{int}})}{(1-g_e)} \right) = S3$$

$$\frac{h_{\text{int}}}{(C_p^2(1-g_e)g_e)} = S4$$

$$\frac{h_{\text{int}} \cdot Bi \cdot (1-s_e)}{C_p^2(1-g_e)g_e} \left( \frac{s_e}{1-s_e} + (1+s_e Bi) \cdot h_{\text{int}} \right) = S5$$

Le système d'équations pour l'Identification en itérant avec Gauss-Seidel est:

$$Bi^{(i+1)} = \frac{S1}{1 - s_e^{(i)}}$$

$$C_p^{(i+1)} = \frac{S2}{g_e^{(i)}}$$

$$h_{\text{int}}^{(i+1)} = \left( S3 \cdot C_p^{(i+1)} - \frac{(1 + (1 - s_e^{(i)}) \cdot Bi^{(i+1)}) \cdot h_{\text{int}}^{(i)}}{1 - g_e^{(i)}} \right) \cdot \left( \frac{g_e^{(i)}}{1 + s_e^{(i)} \cdot Bi^{(i+1)}} \right)$$

$$g_e^{(i+1)} = \frac{h_{\text{int}}^{(i+1)}}{S4 \cdot C_p^{(i+1)2} (1 - g_e^{(i)})}$$

$$s_e^{(i+1)} = \left( S5 \cdot \frac{C_p^{(i+1)2} (1 - g_e^{(i+1)}) g_e^{(i+1)}}{h_{\text{int}}^{(i+1)} \cdot Bi^{(i+1)} \cdot (1 - s_e^{(i)})} - (1 + s_e^{(i)} Bi^{(i+1)}) \cdot h_{\text{int}}^{(i+1)} \right) \cdot (1 - s_e^{(i)})$$

## Annexe 4

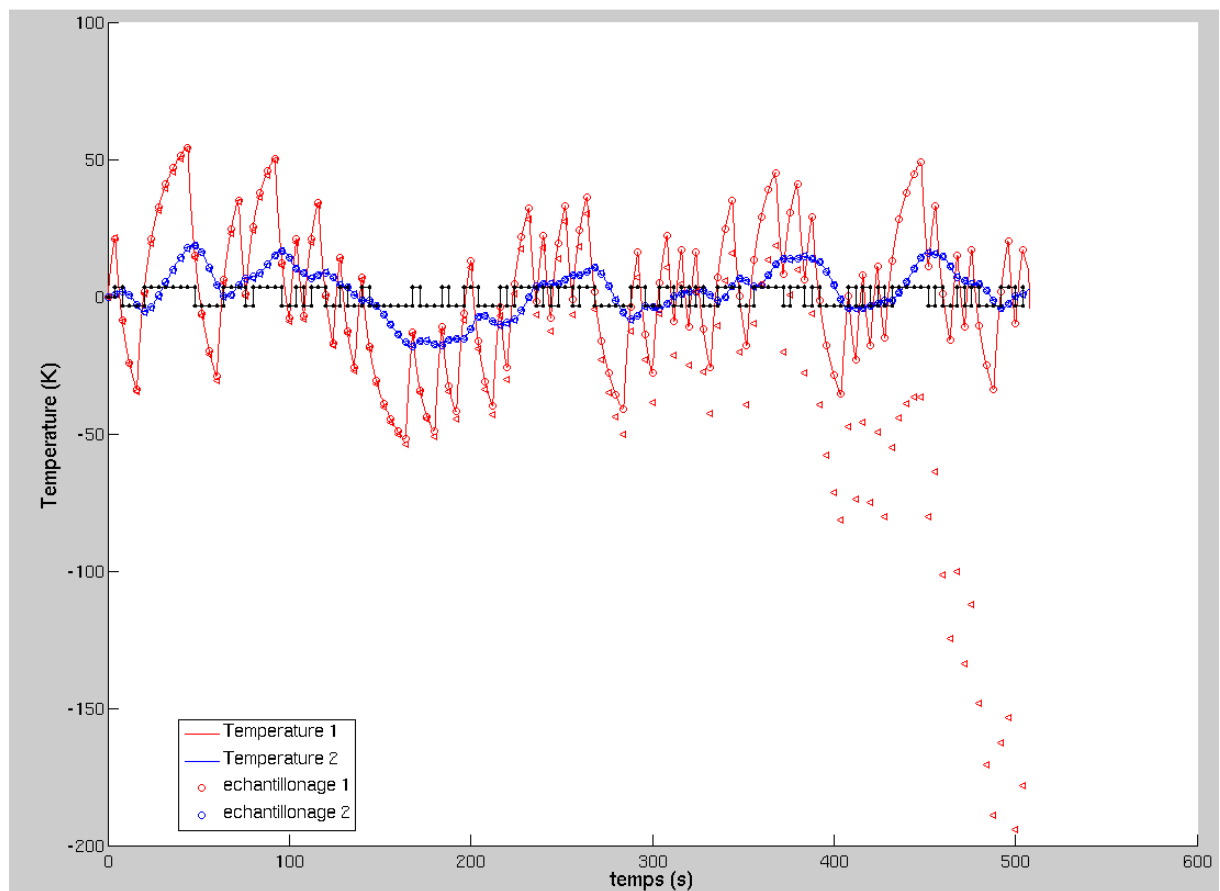
# Résultats des expériences avec le barreau de Niobium

- Pour l'échelon 1:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0033\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 (T <sub>e</sub> )	-3.4351	4.3315	-2.3629	0.4666	0.5960	-1.7147	1.6619	-0.5747	0.0316
T2 (T <sub>p</sub> )	-3.3268	4.0480	-2.1180	0.3969	0.0254	-0.0045	-0.0524	0.0141	0.0174

**Tableau A4-1. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 1**



**Figure A4-1. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 1**

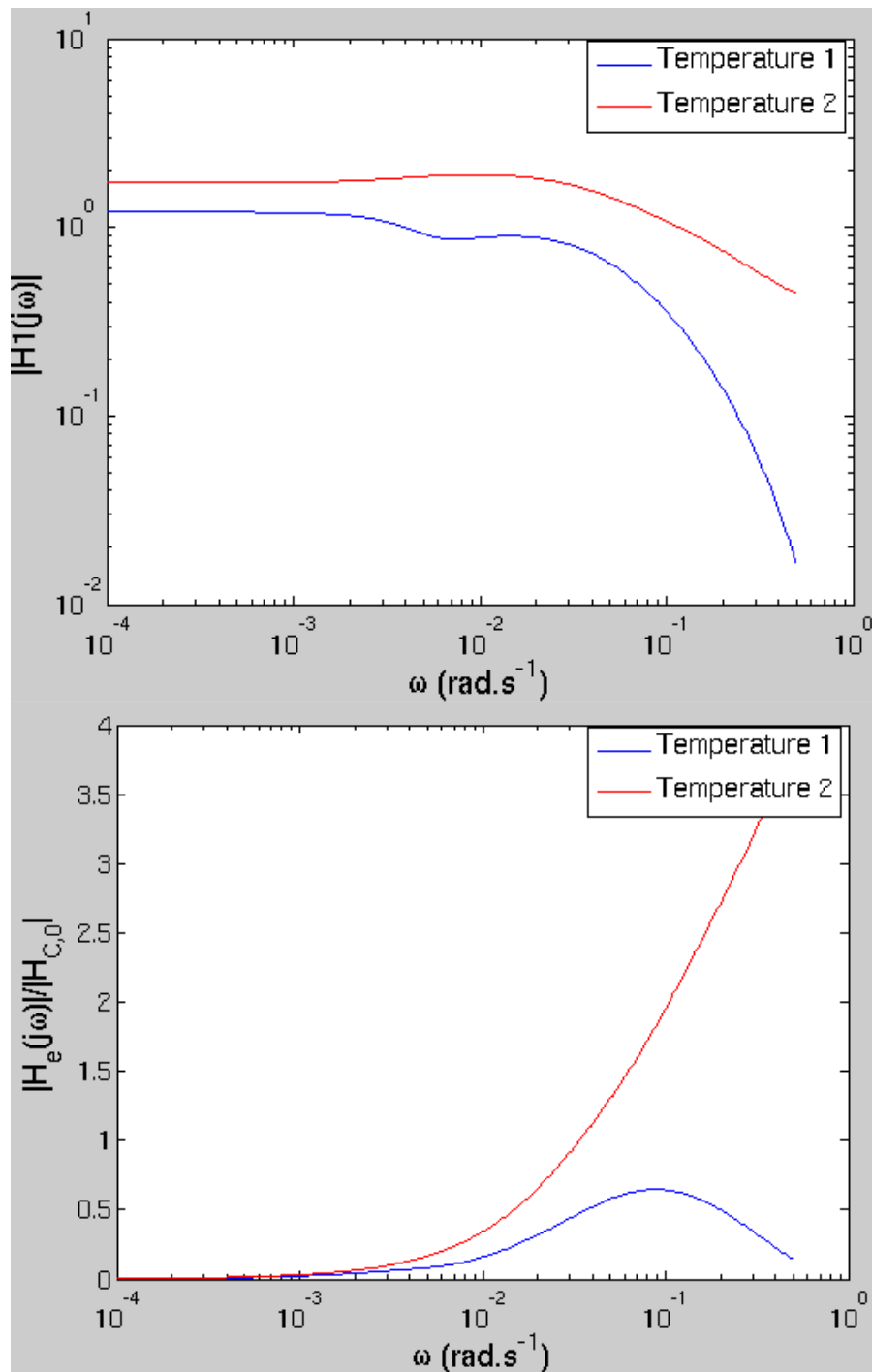


Figure A4-2. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarythmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 1

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	5.9648	5.16
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	23.74	22.06

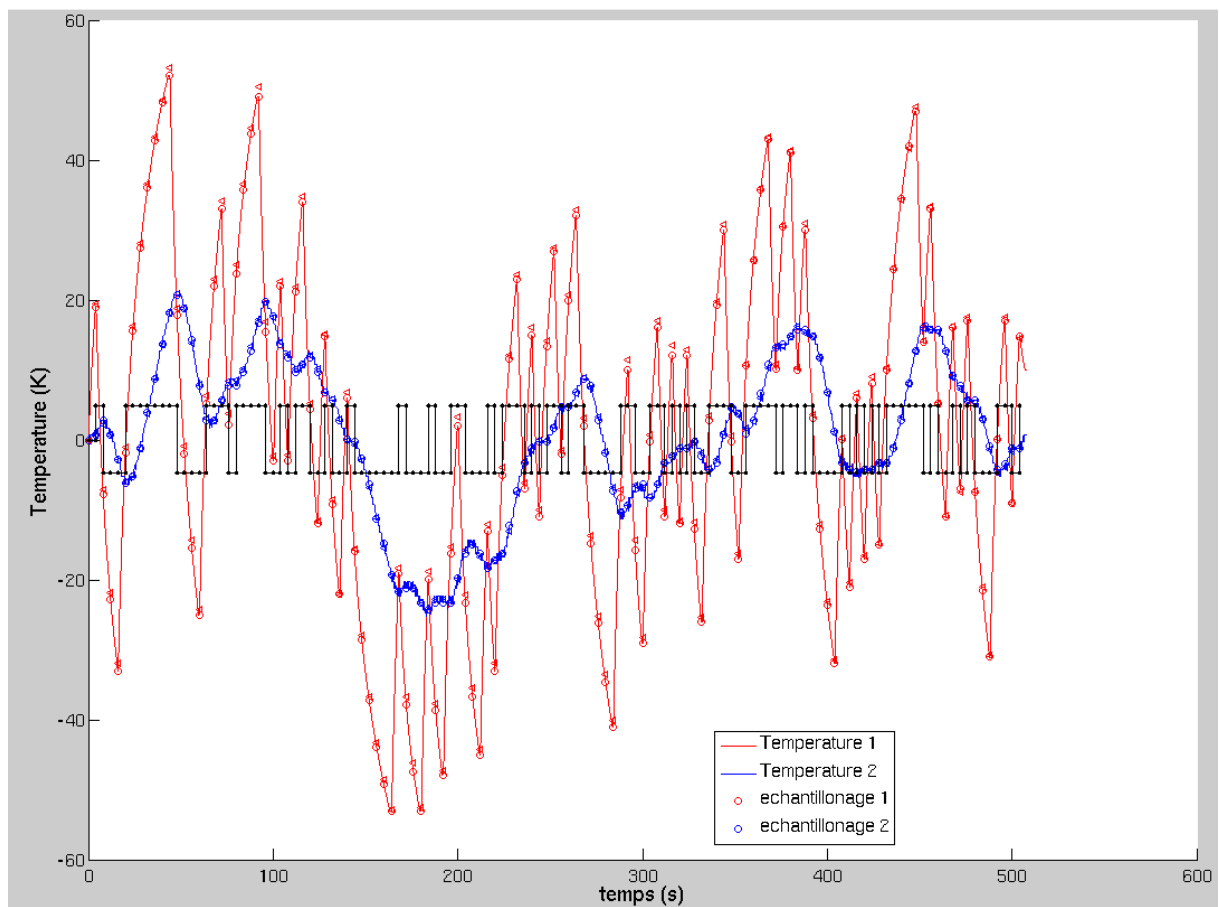
Tableau A4-2. Temps caractéristiques pour la séquence 1

- Pour l'échelon 2:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0035\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 (T <sub>e</sub> )	-3.4307	4.3320	-2.3728	0.4715	0.6112	-1.7277	1.6449	-0.5542	0.0259
T2 (T <sub>p</sub> )	-3.1741	3.7139	-1.8934	0.3536	0.0218	0.0197	-0.0705	0.0158	0.0132

**Tableau A4-3. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 2**



**Figure A4-3. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 2**

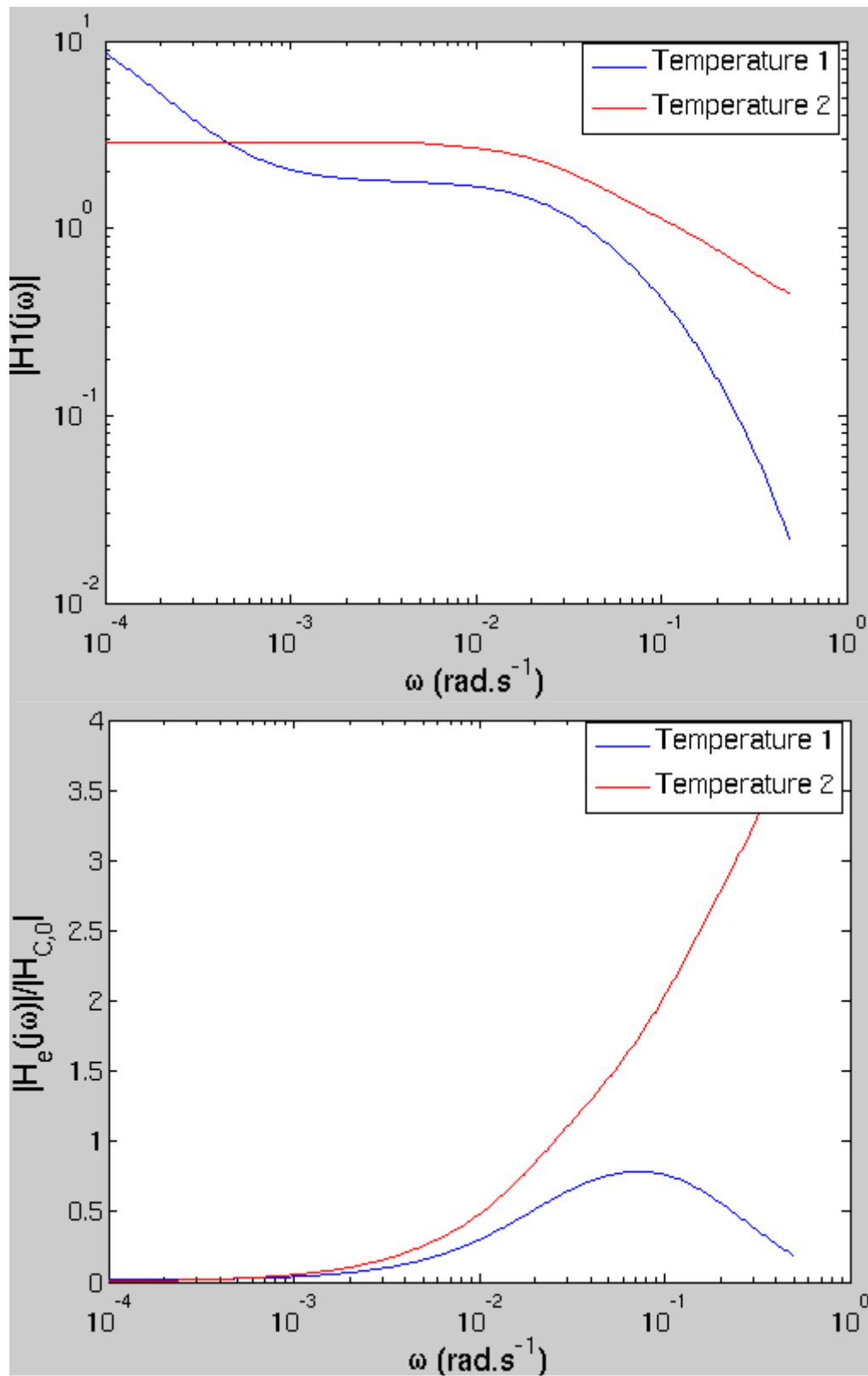


Figure A4-4. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarythmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 2



	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	6.07	6
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	35.42	14

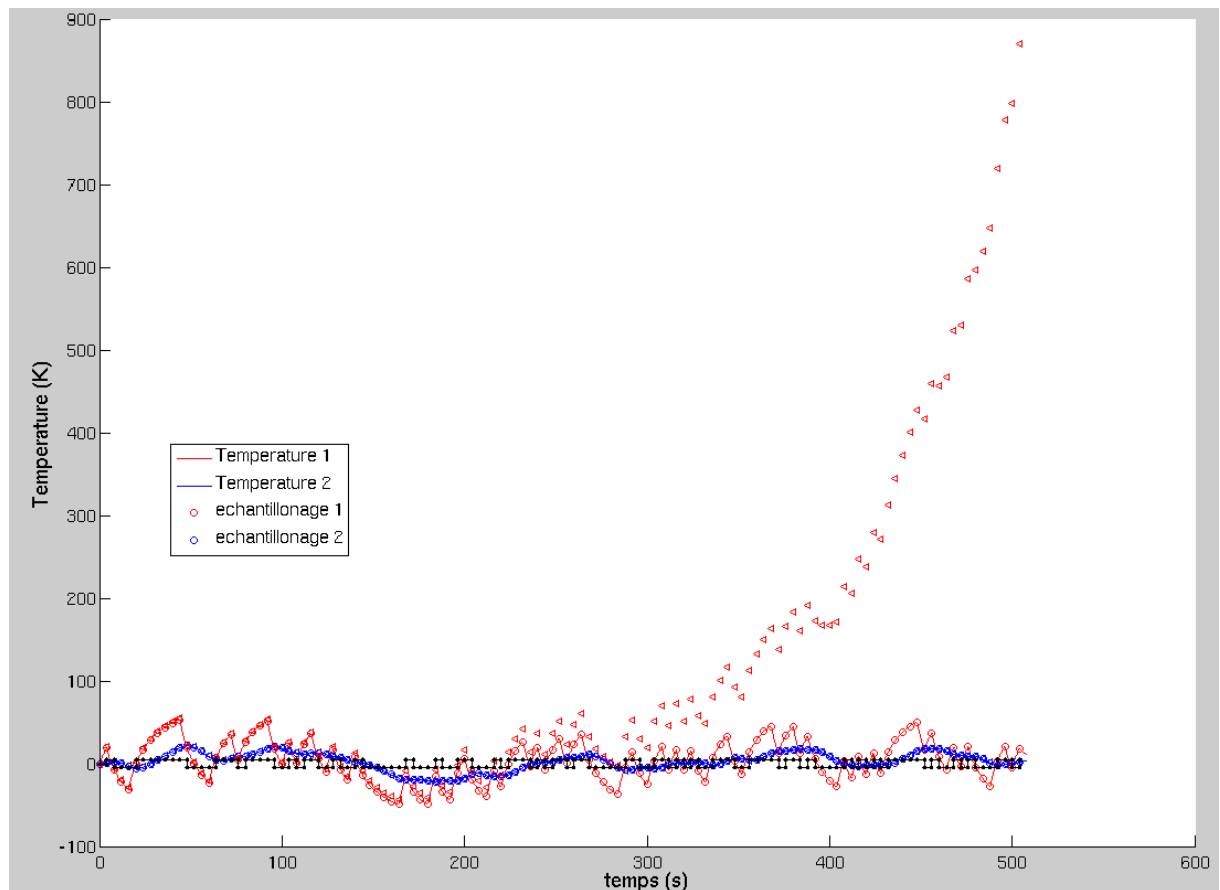
**Tableau A4-4. Temps caractéristiques pour la séquence 2**

- Pour l'échelon 3:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0036\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.5780	4.7393	-2.7464	0.5851	0.6074	-1.8130	1.8512	-0.6982	0.0527
T2 ( $T_p$ )	-3.4022	4.2529	-2.300	0.4494	0.0170	0.0279	-0.0915	0.0290	0.0177

**Tableau A4-5. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 3**



**Figure A4-5. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 3**

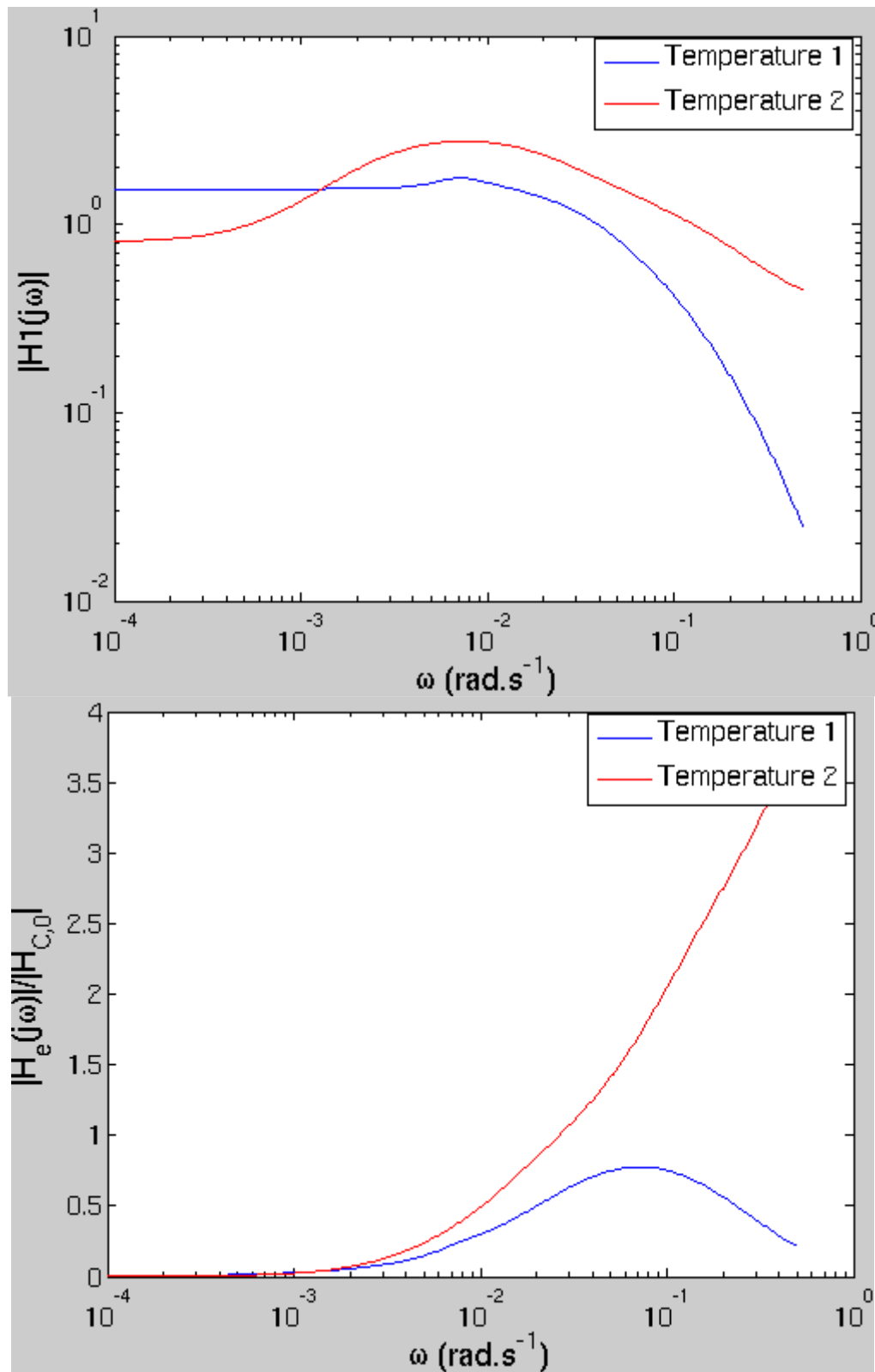


Figure A4-6. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 3

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	7.8866	5.74
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	52.2525	31.71

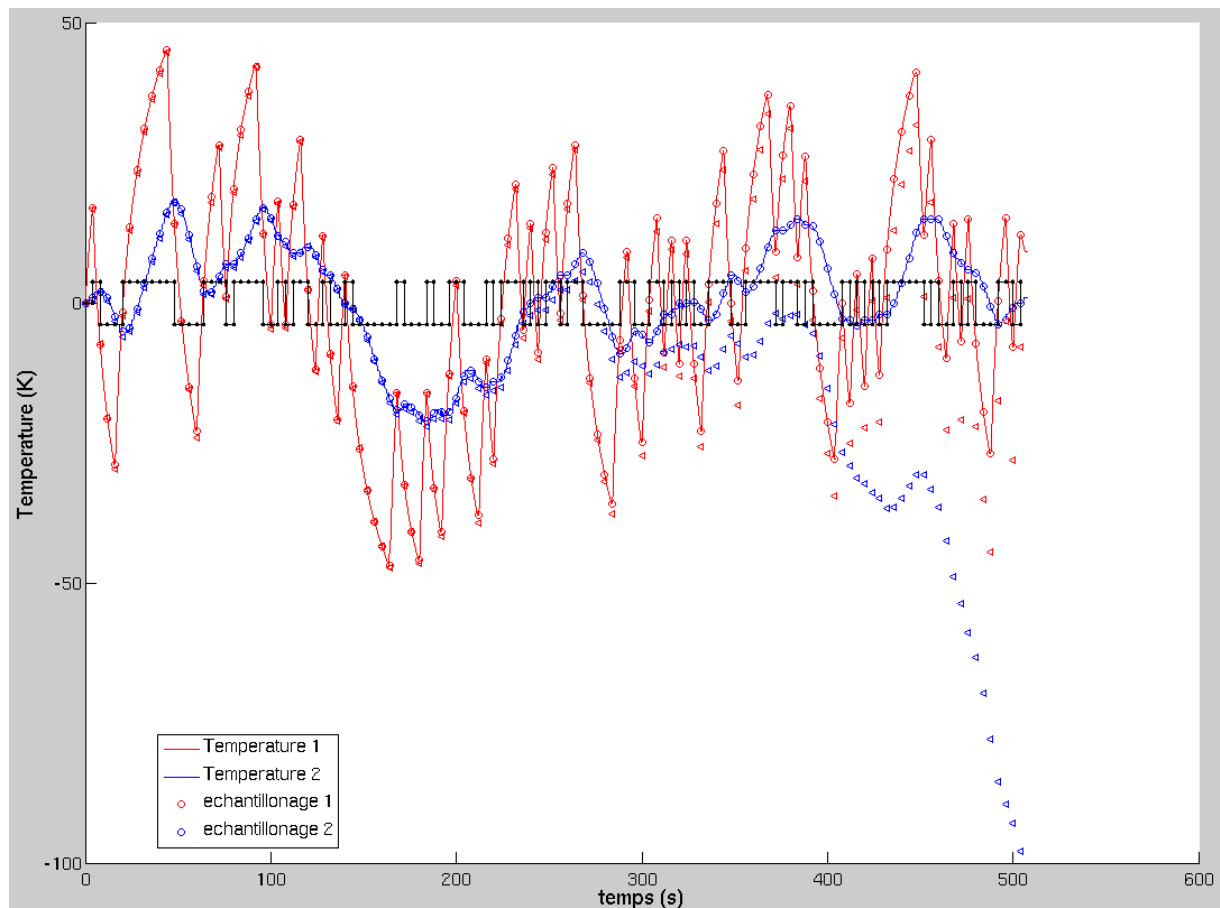
**Tableau A4-6. Temps caractéristiques pour la séquence 3**

- Pour l'échelon 4:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0036\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.4790	4.4463	-2.4594	0.4922	0.6119	-1.7639	1.7107	-0.5882	0.0298
T2 ( $T_p$ )	-3.4960	4.4971	-2.5106	0.5096	0.0256	0.0050	-0.0807	0.0360	0.0143

**Tableau A4-7. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 4**



**Figure A4-7. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 4**

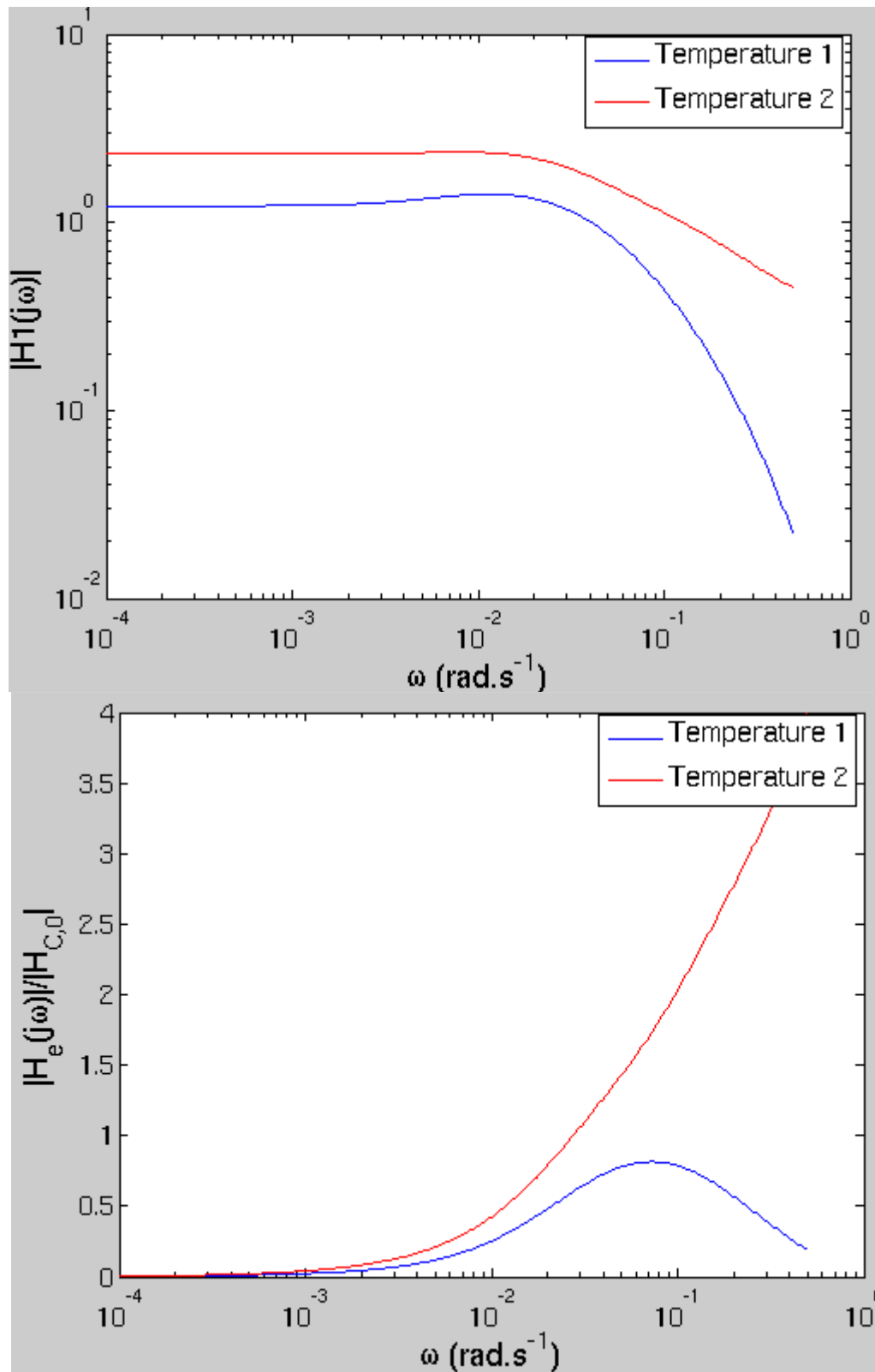


Figure A4-8. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 4

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	6.038	6.4431
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	30.957	28.16

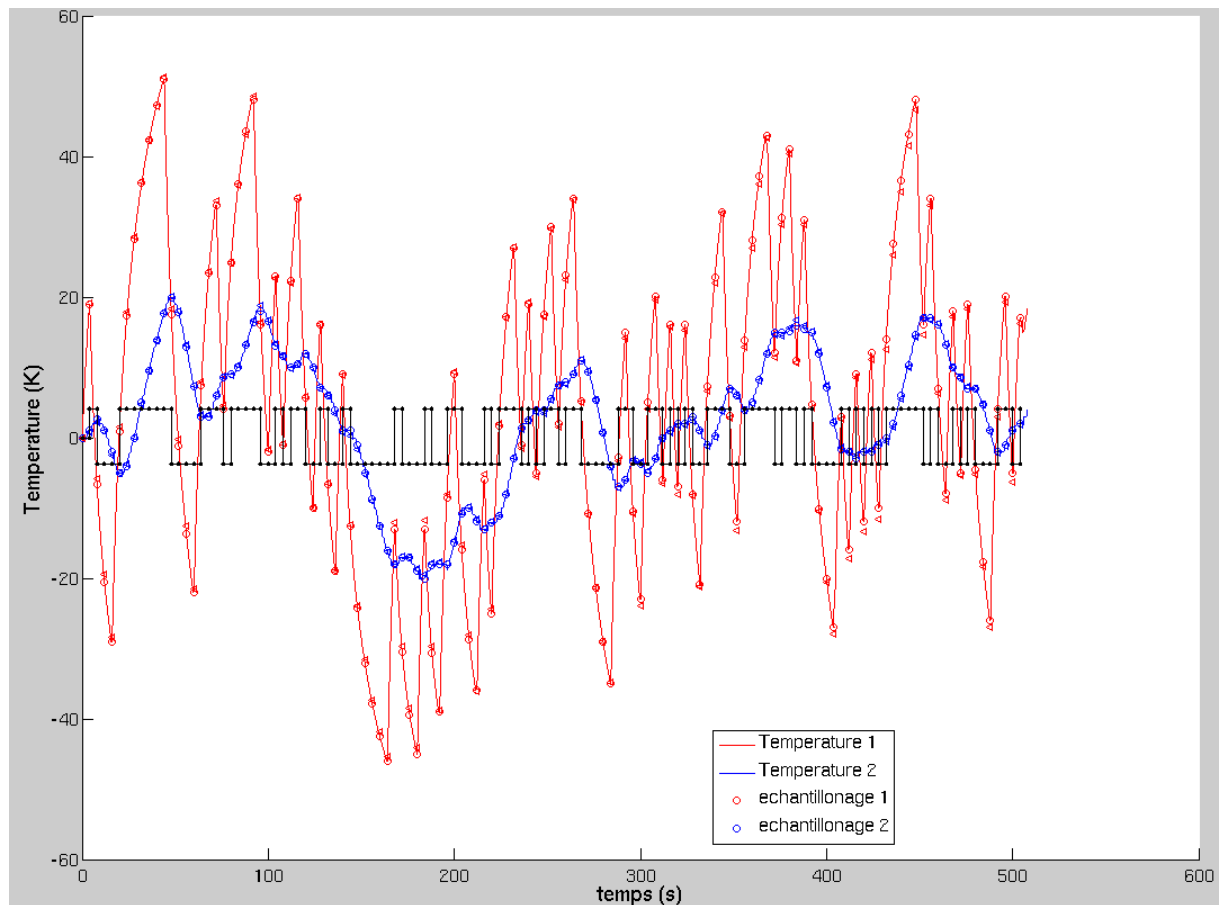
**Tableau A4-8. Temps caractéristiques pour la séquence 4**

- Pour l'échelon 5:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0037\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.1618	3.6496	-1.8066	0.3186	0.6068	-1.5609	1.3303	-0.3854	0.0089
T2 ( $T_p$ )	-3.3394	4.0894	-2.1600	0.4100	0.0230	0.0112	-0.0725	0.0204	0.0180

**Tableau A4-9. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 5**



**Figure A4-9. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 5**

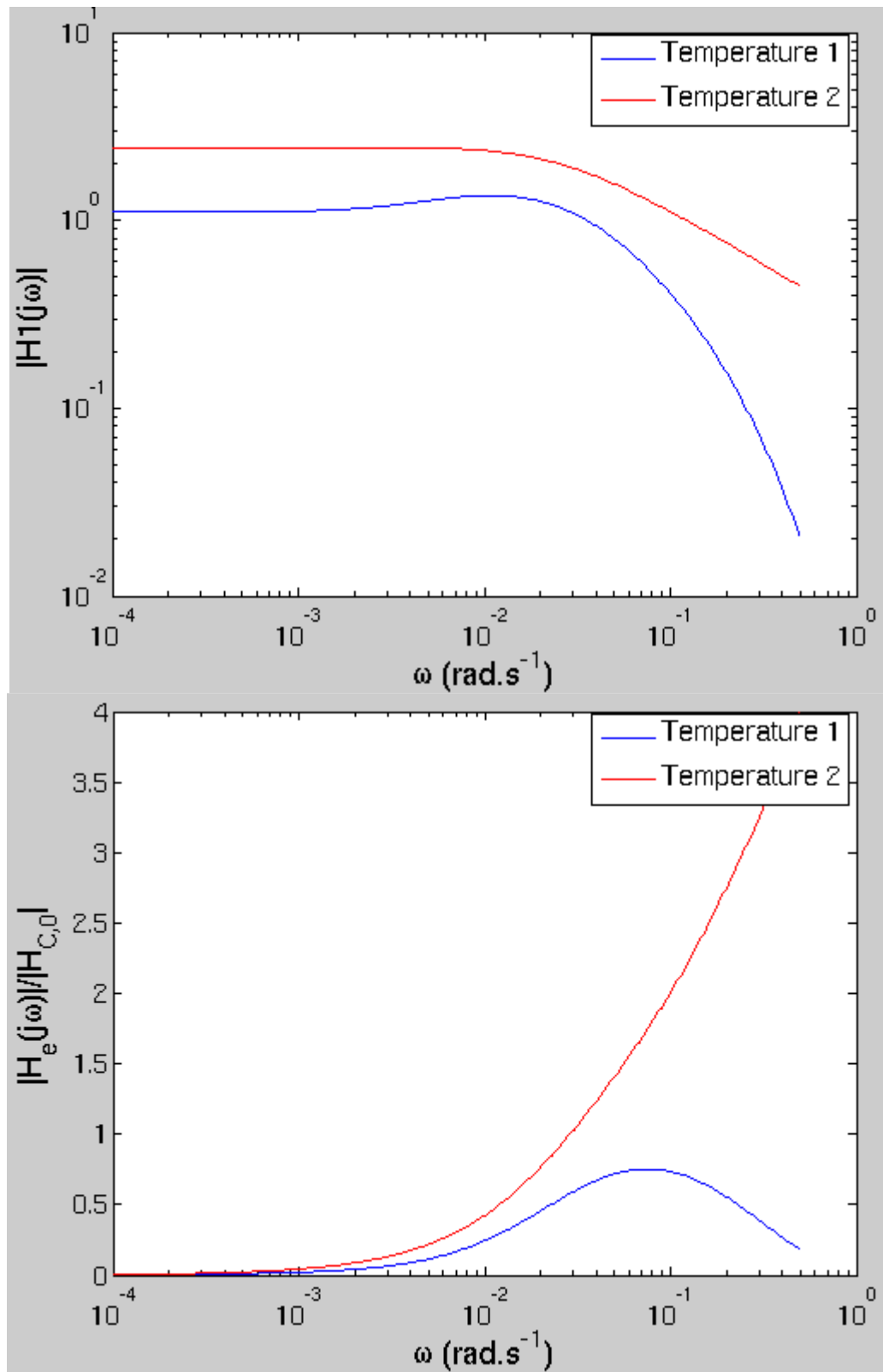


Figure A4-10. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 5

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	4.67	5.33
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	19.23	30.82

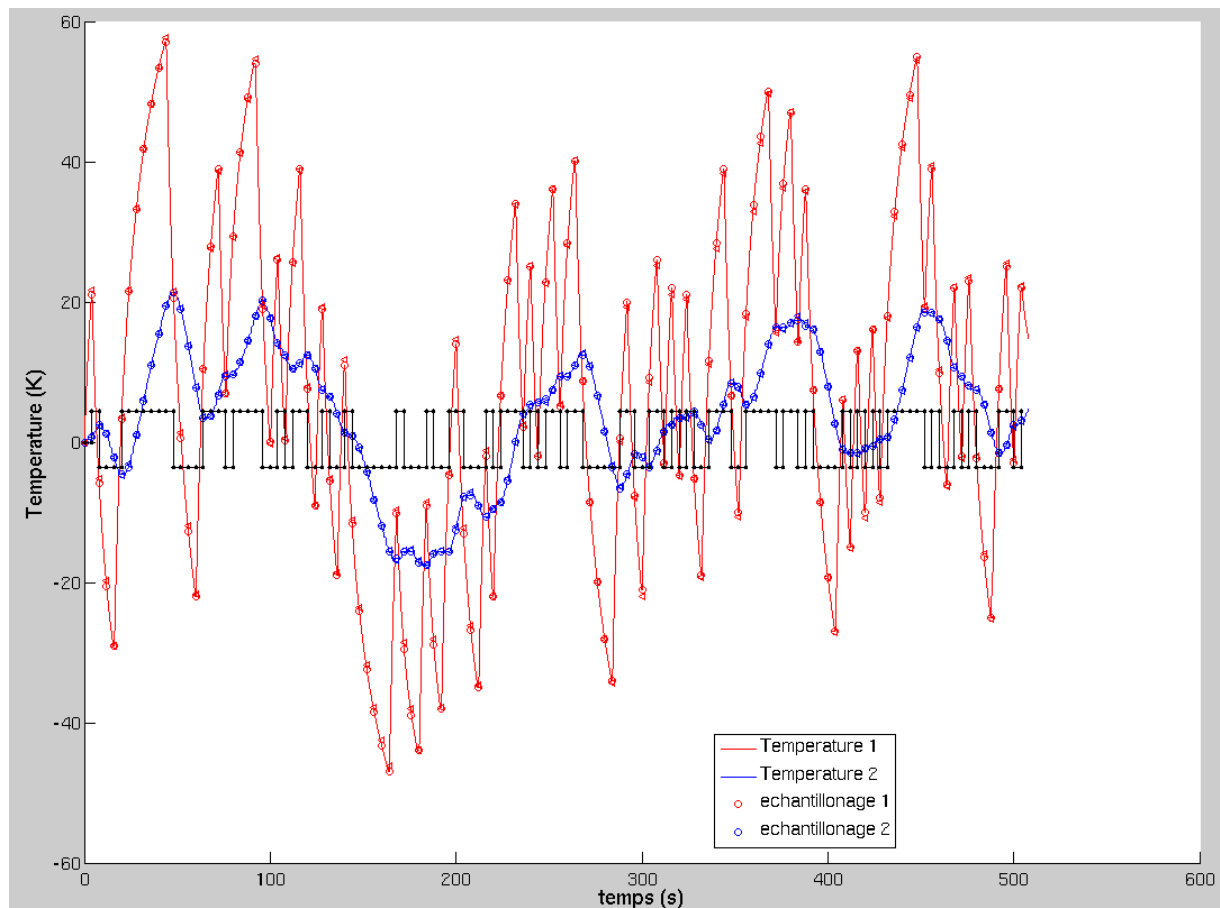
**Tableau A4-10. Temps caractéristiques pour la séquence 5**

- Pour l'échelon 6:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0038\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-2.7463	2.6611	-1.0529	0.1373	0.6004	-1.2974	0.8728	-0.1776	-0.001
T2 ( $T_p$ )	-3.3327	4.0643	-2.1314	0.3998	0.0230	0.0065	-0.0639	0.0149	0.0195

**Tableau A4-11. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 6**



**Figure A4-11. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 6**

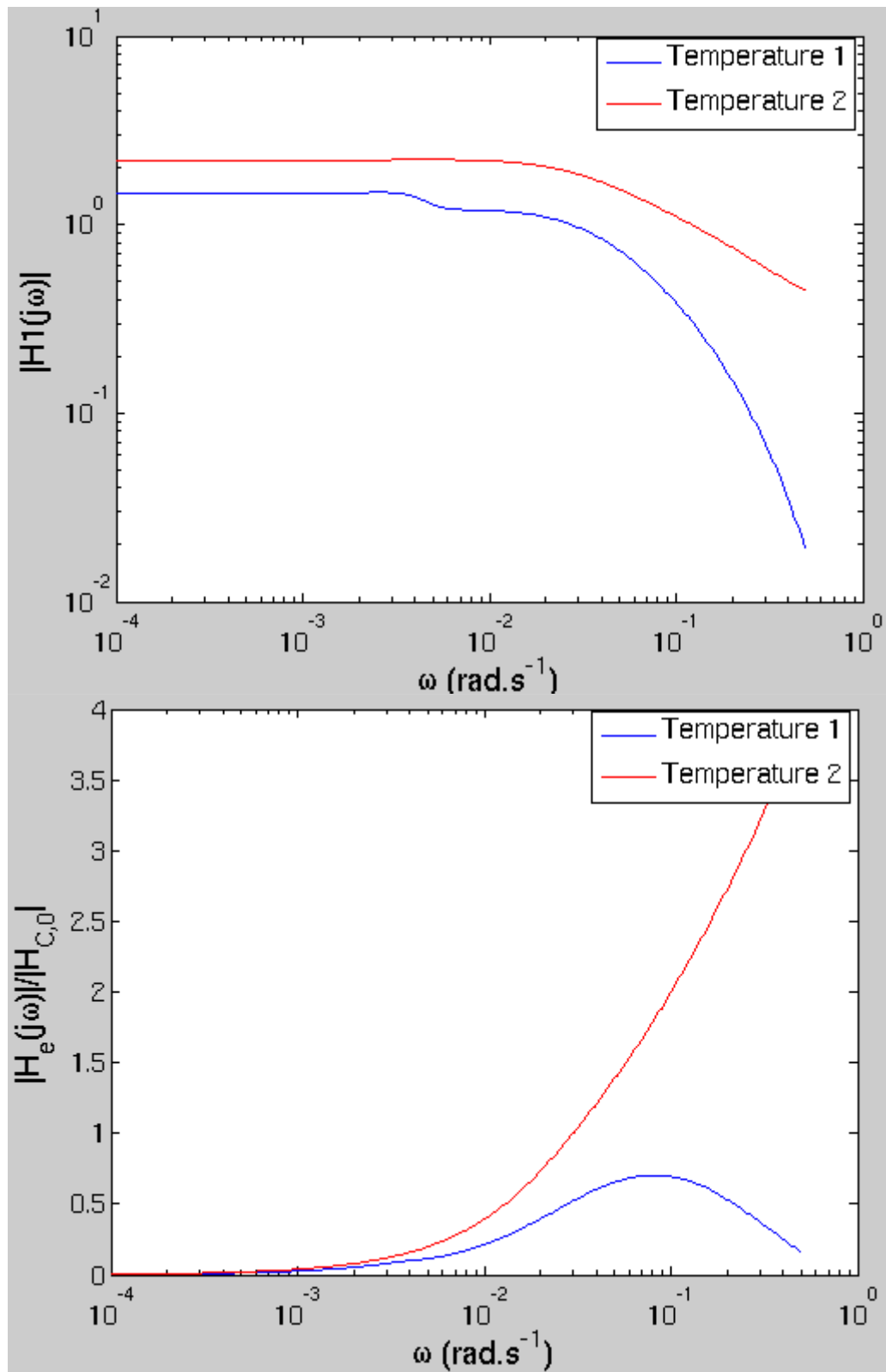


Figure A4-12. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 6



	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	2.95	5.12
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	7.88	26.54

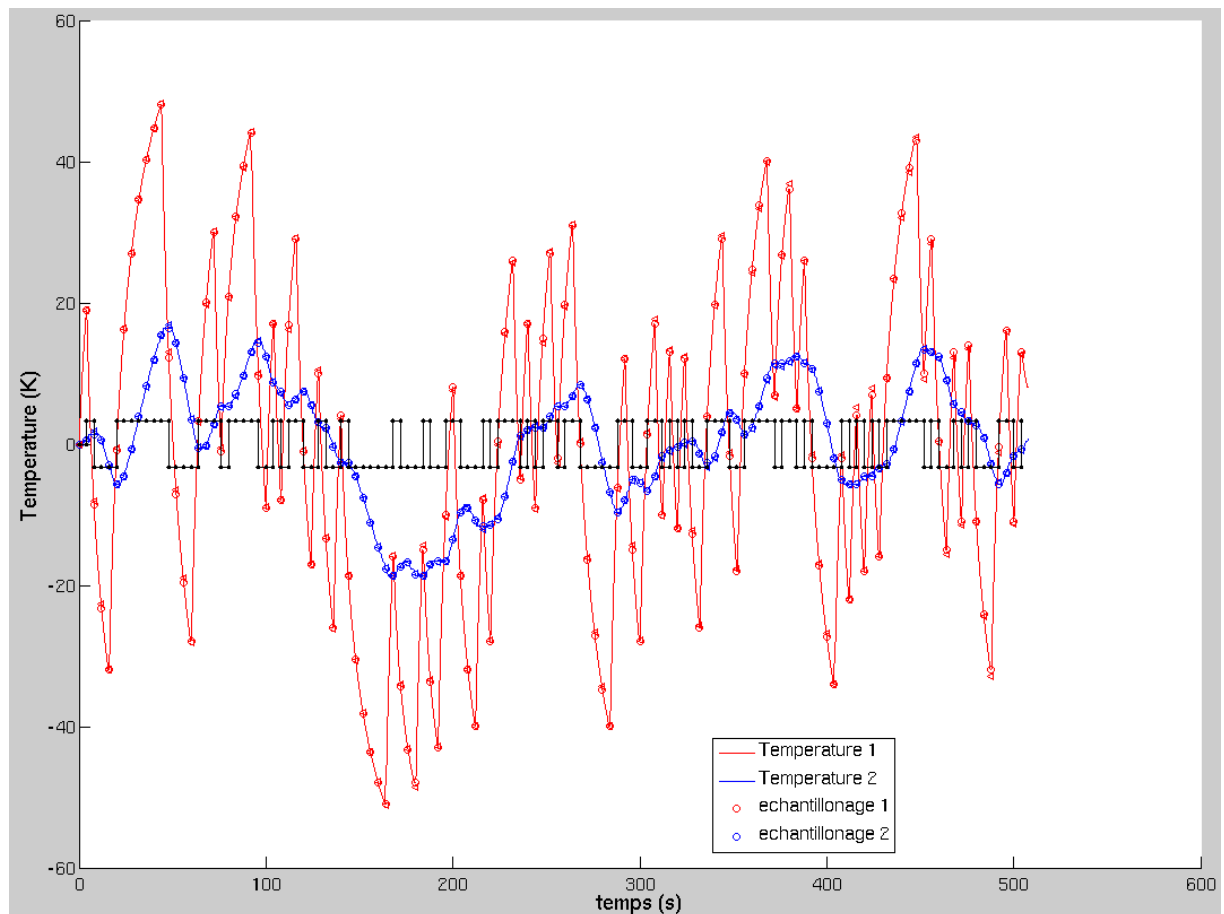
**Tableau A4-12. Temps caractéristiques pour la séquence 6**

- Pour l'échelon 7:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0039\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-2.2505	1.4807	-0.1474	-0.0835	0.6119	-1.0251	0.3487	0.0757	-0.0130
T2 ( $T_p$ )	-3.3137	4.0182	-2.0964	0.3918	0.0242	0.0022	-0.0584	0.0126	0.0194

**Tableau A4-13. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 7**



**Figure A4-13. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 7**

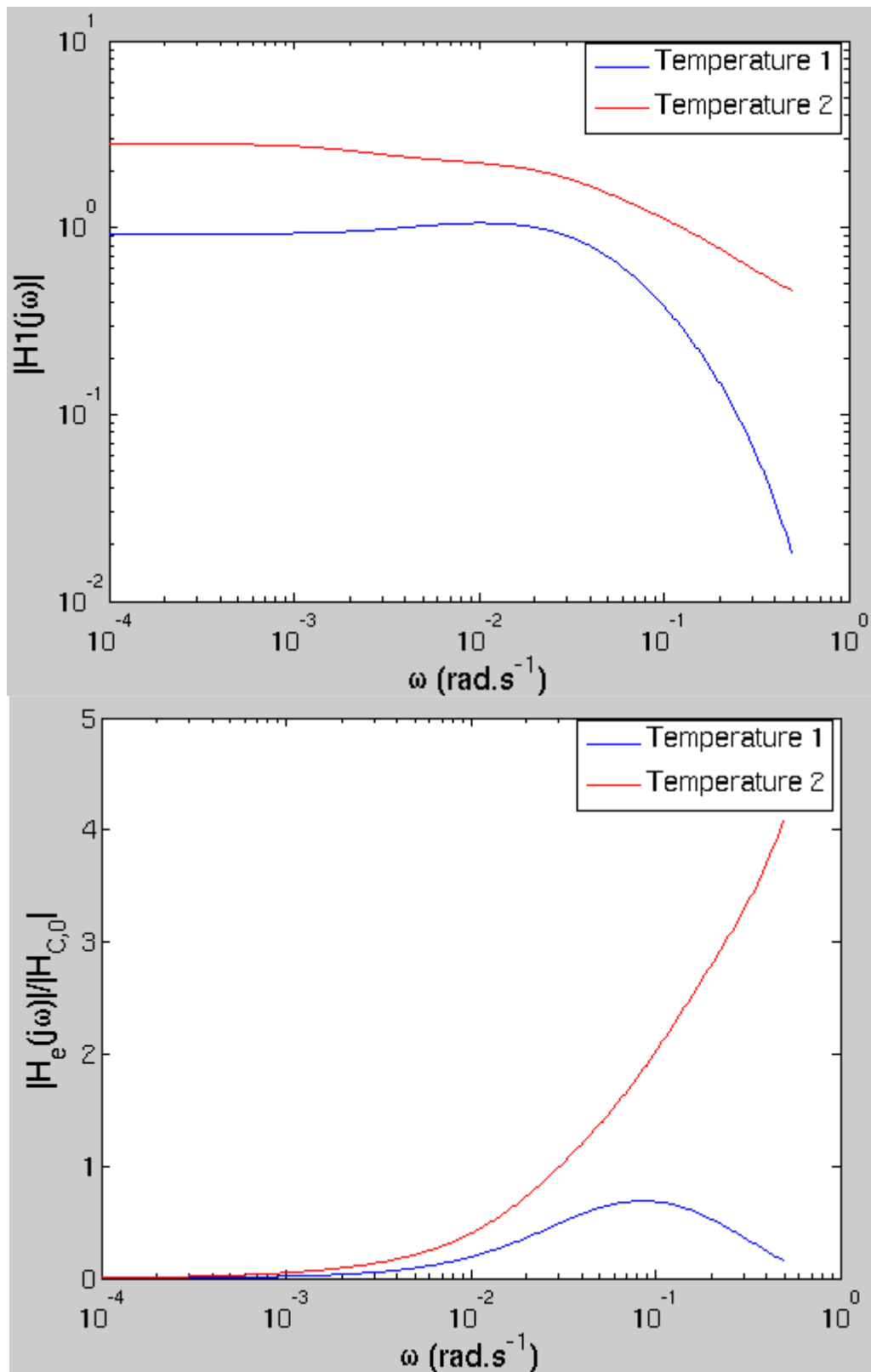


Figure A4-14. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 7

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	NA	5.15
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	6.61	23.89

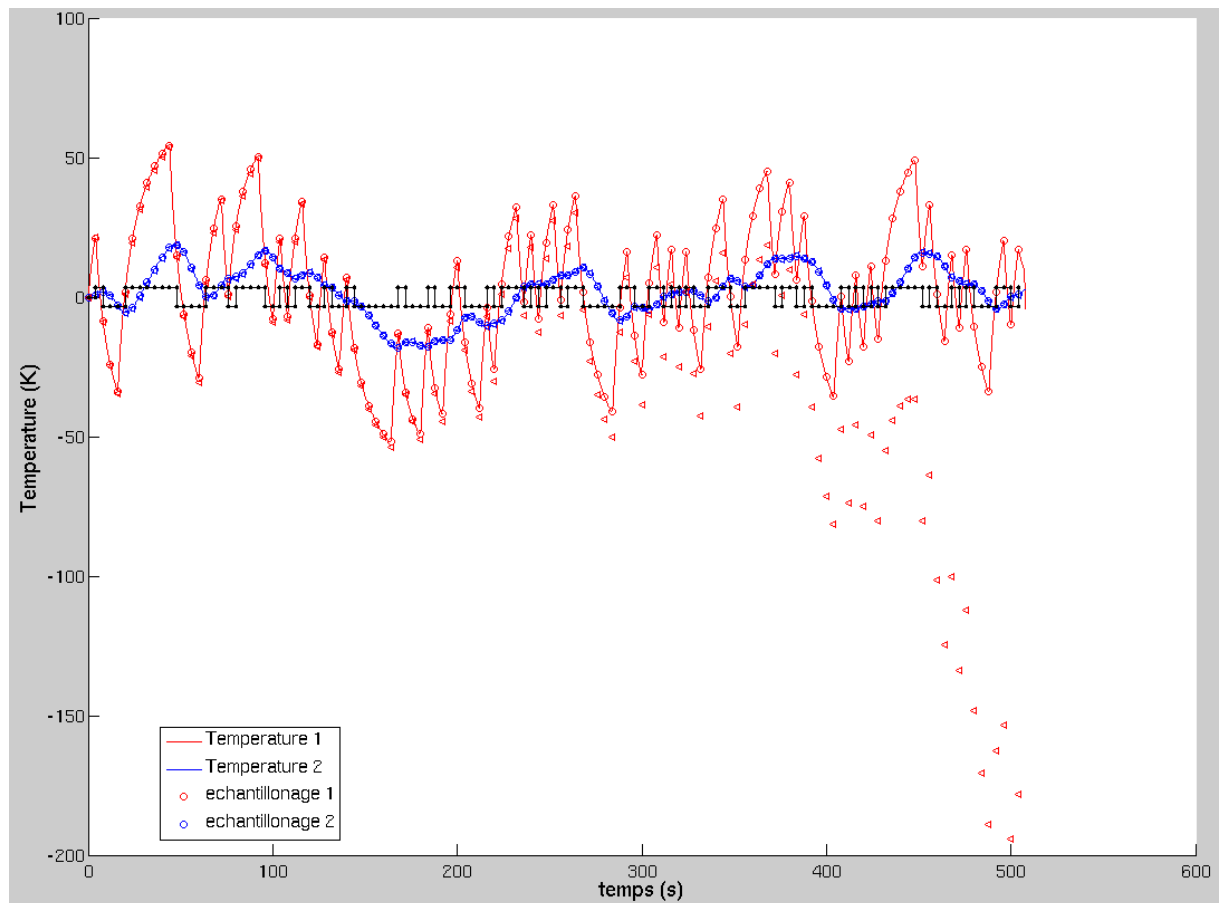
**Tableau A4-14. Temps caractéristiques pour la séquence 7**

- Pour l'échelon 8:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0041\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.4351	4.3315	-2.3629	0.4666	0.5960	-1.7147	1.6619	-0.5747	0.0316
T2 ( $T_p$ )	-3.3268	4.0480	-2.1180	0.3969	0.0254	-0.0045	-0.0524	0.0141	0.0174

**Tableau A4-15. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 8**



**Figure A4-15. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 8**

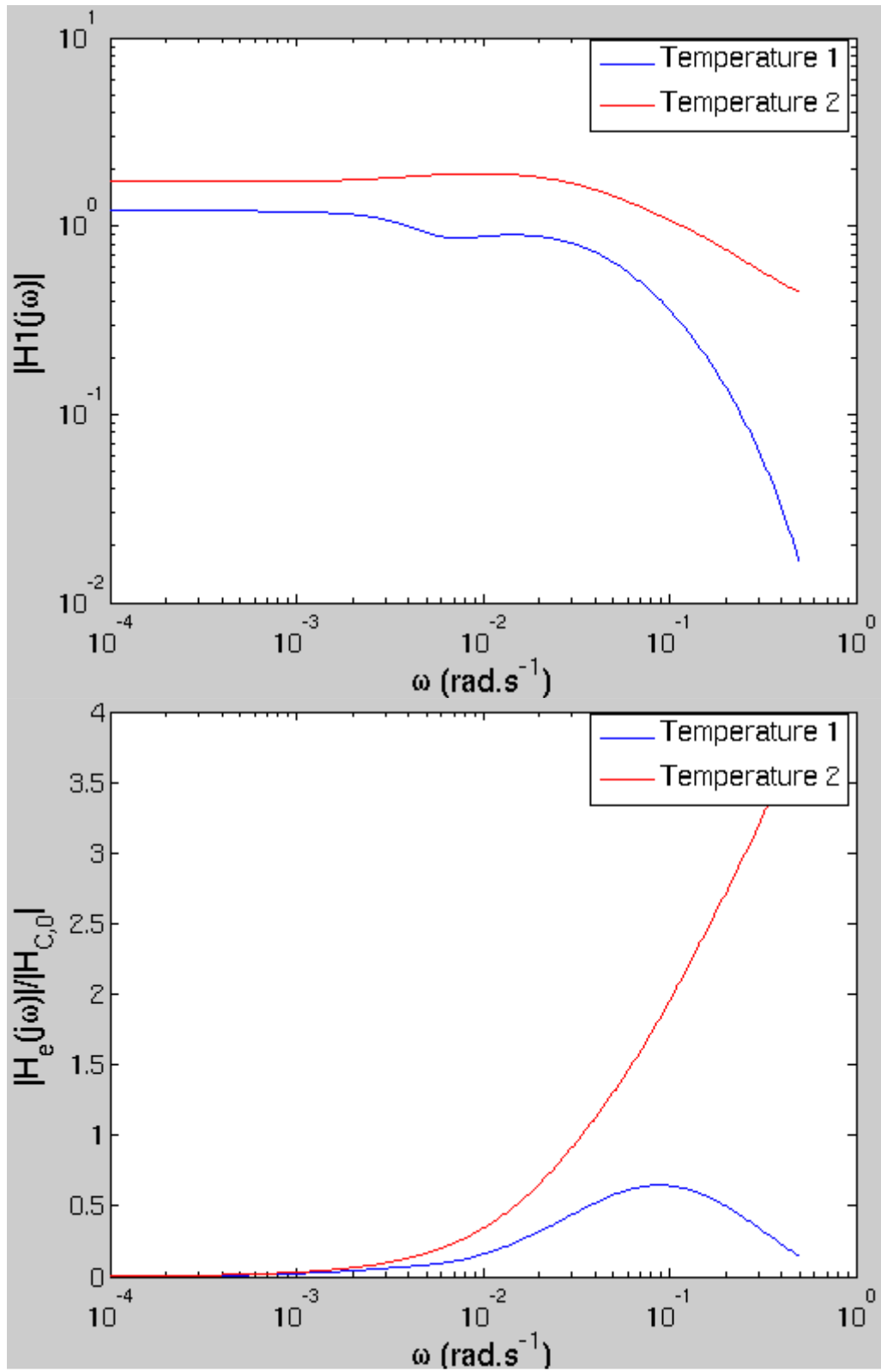


Figure A4-16. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 8

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	5.96	5.16
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	23.74	22.06

**Tableau A4-16. Temps caractéristiques pour la séquence 8**

Comment on peut voir sur les résultats, pour l'identification seulement marchent bien les échelons 2, 5, 6 et 7. Pour l'étude des propriétés thermophysiques, le programme n'est pas capable de donner valeurs numériques pour la grande divergence existant dans l'algorithme de Gauss-Seidel.

## Annexe 5

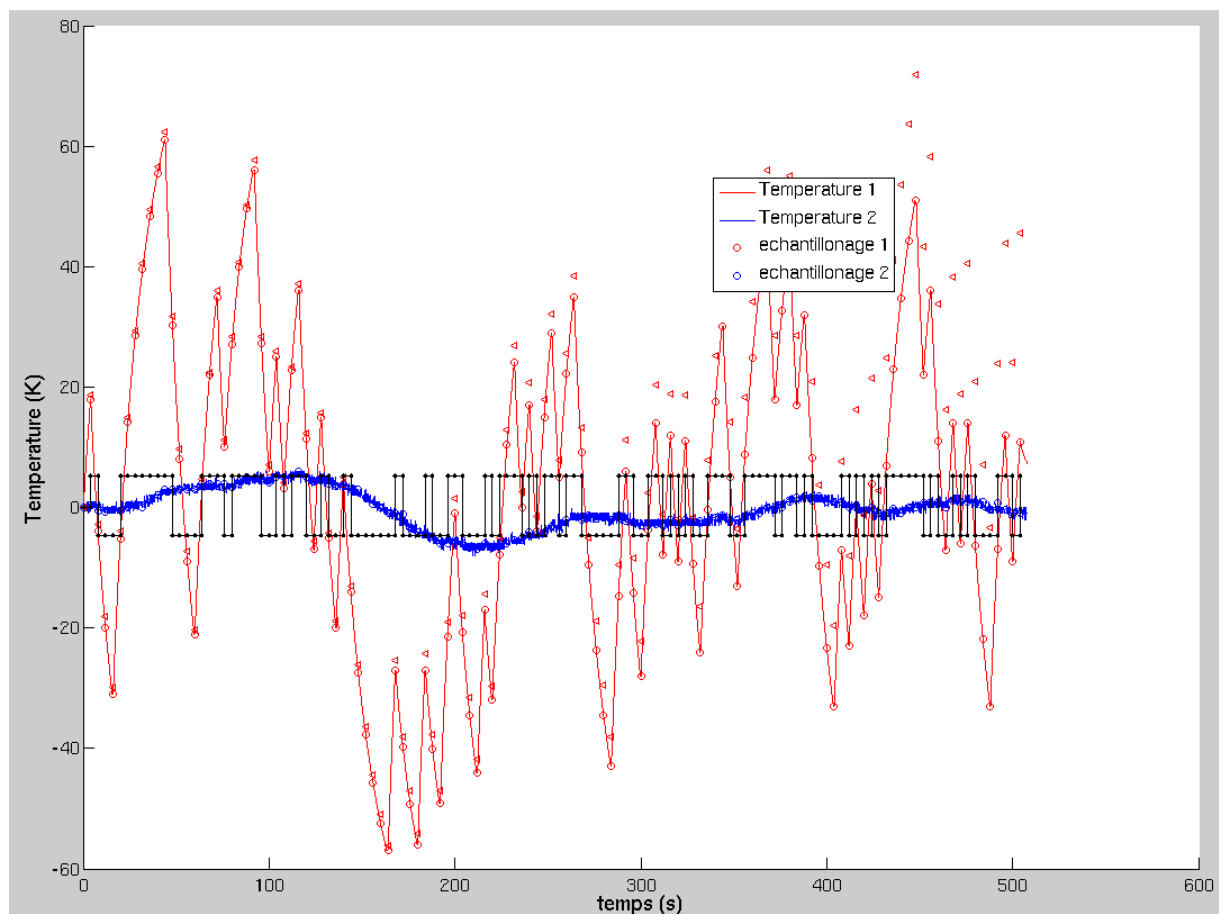
# Résultats des expériences avec le barreau de Fer Pur

- Pour l'échelon 1:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0053\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 (T <sub>e</sub> )	-3.6565	4.9773	-2.9862	0.6654	0.6651	-1.9391	1.8910	-0.6303	0.0135
T2 (T <sub>p</sub> )	-2.4639	1.6594	0.0807	-0.2763	0.0137	-0.0208	0.0046	0.0102	-0.0081

**Tableau A5-1. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 1**



**Figure A5-1. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 1**

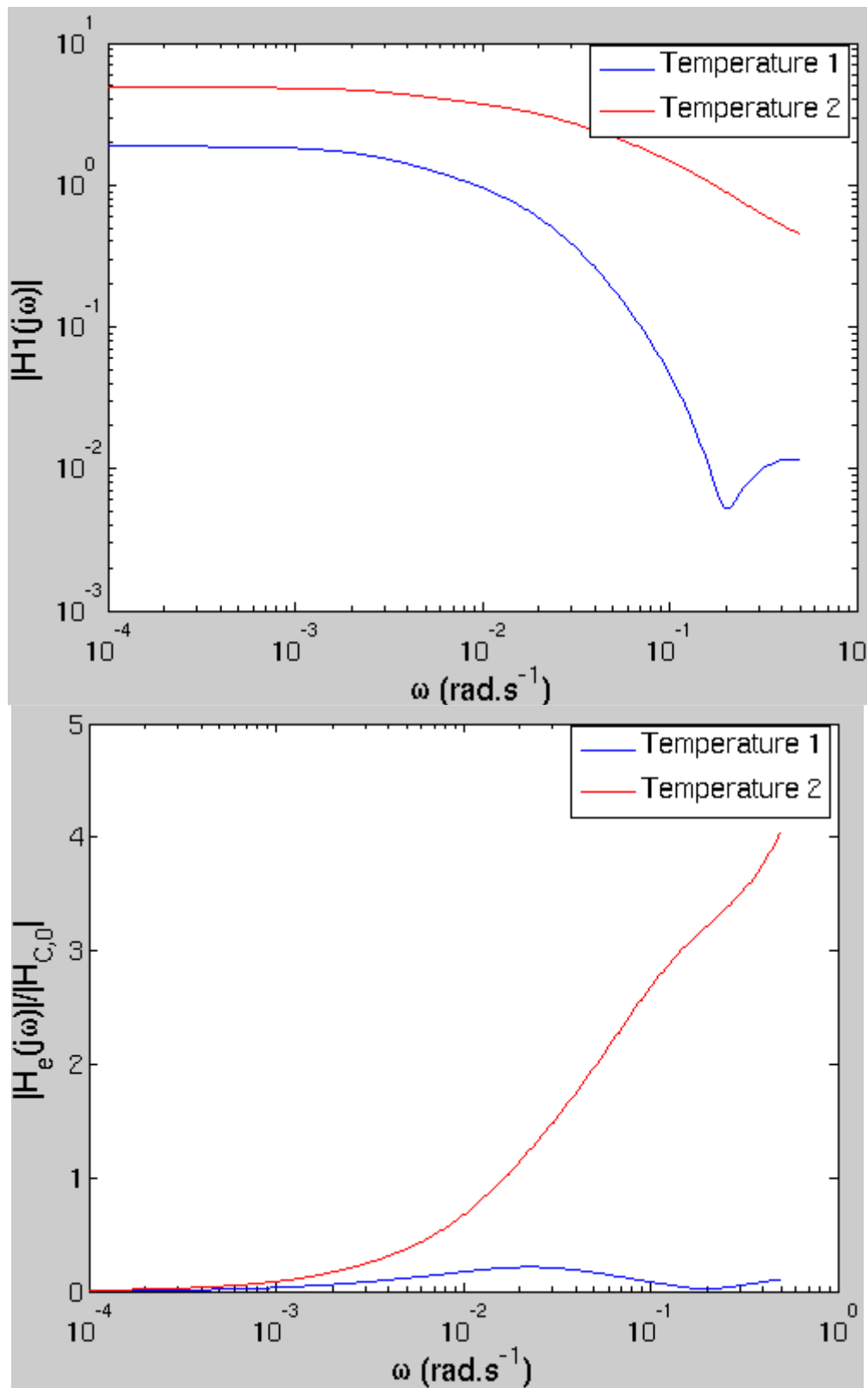


Figure A5-2. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarythmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 1

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	11.01	NA
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	41.63	24.21

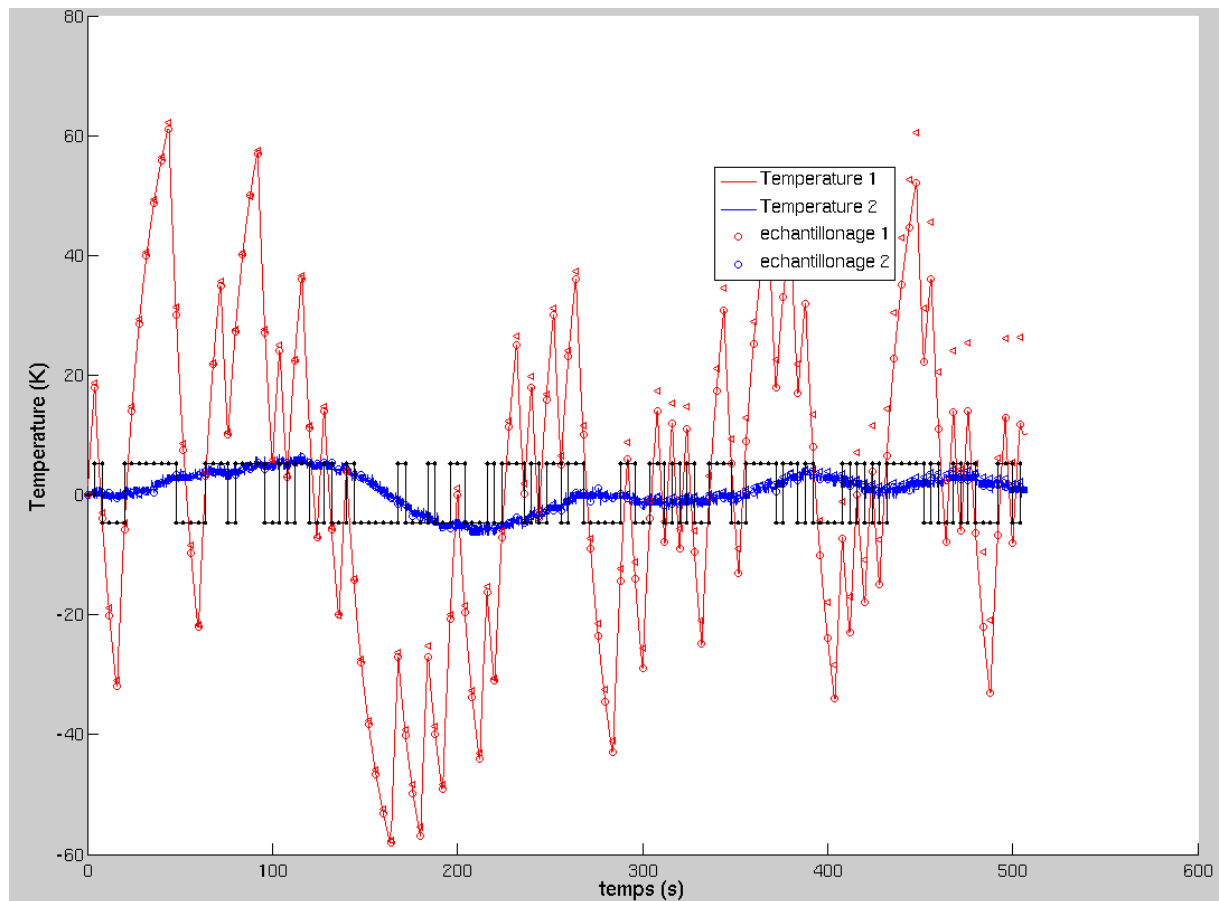
**Tableau A5-2. Temps caractéristiques pour la séquence 1**

- Pour l'échelon 2:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0052\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.6157	4.8576	-2.87	0.6281	0.644	-1.8487	1.7604	-0.5596	0.0037
T2 ( $T_p$ )	-2.2035	0.9197	0.7883	-0.5046	0.0142	-0.0185	-0.0017	0.0162	-0.0102

**Tableau A5-3. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 2**



**Figure A5-3. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 2**



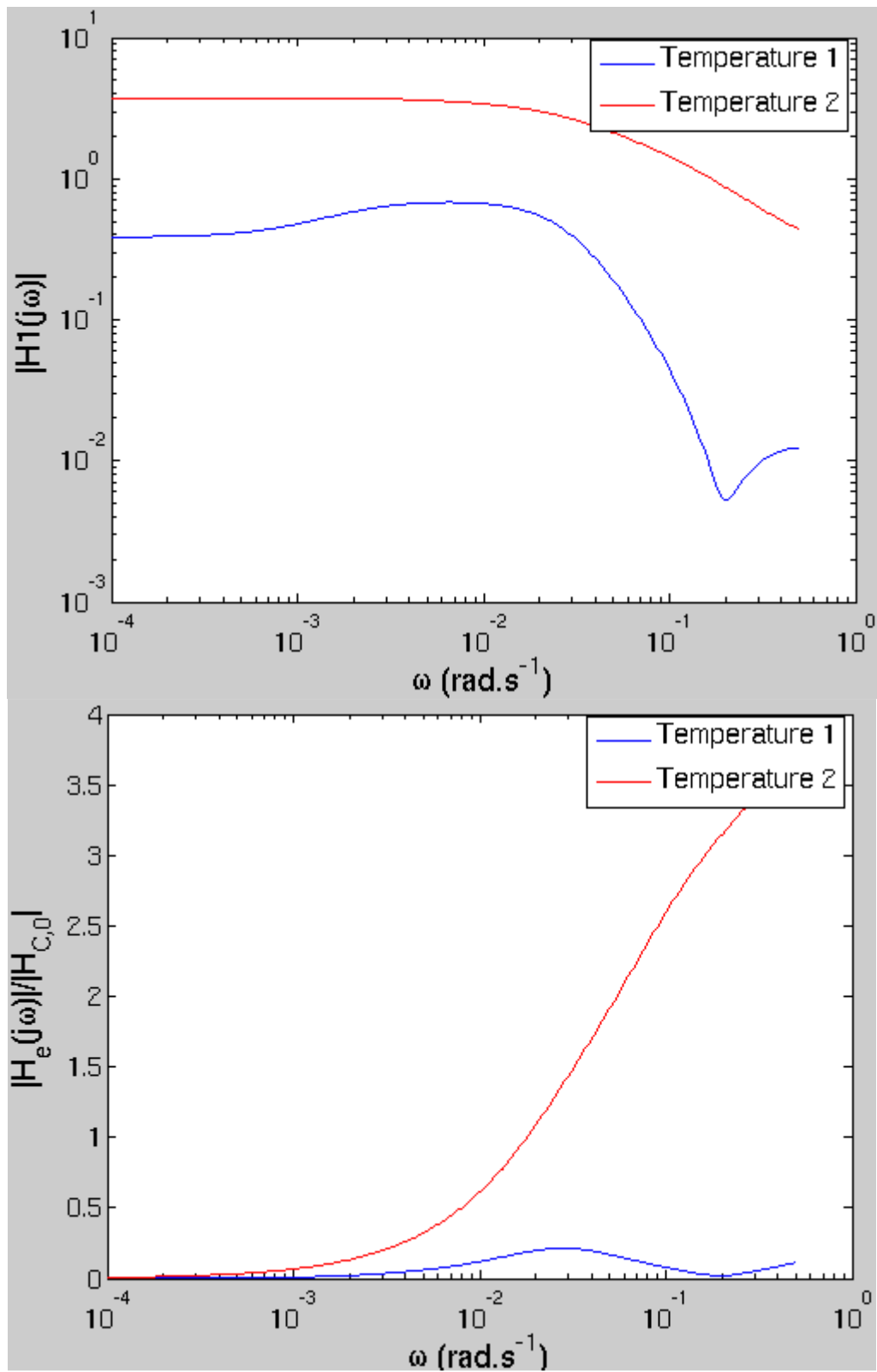


Figure A5-4. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarythmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 2

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	9.79	NA
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	33.97	NA

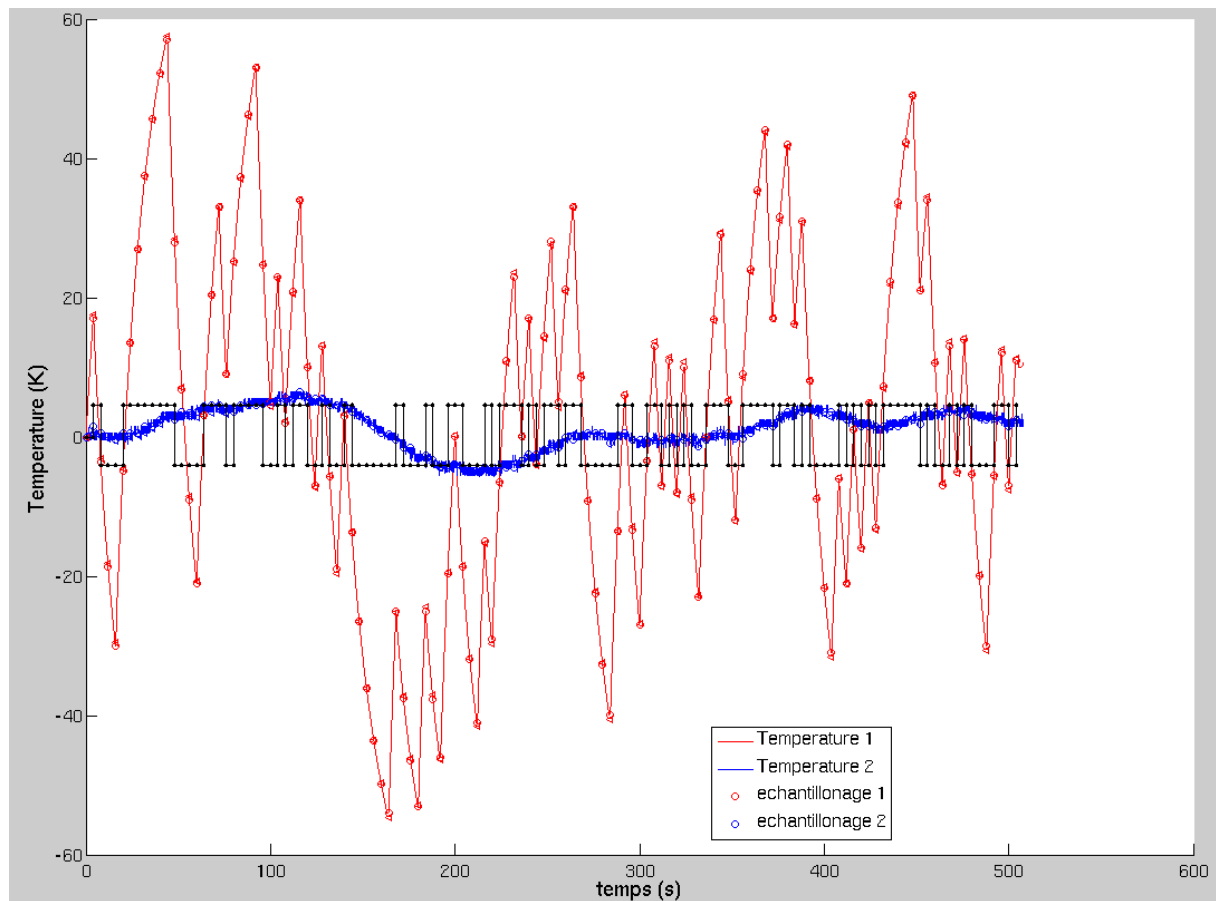
**Tableau A5-4. Temps caractéristiques pour la séquence 2**

- Pour l'échelon 3:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0051\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.4499	4.4093	-2.4686	0.5092	0.6627	-1.7932	1.5964	-0.4627	-0.0032
T2 ( $T_p$ )	-3.1842	3.6906	-1.8189	0.3125	0.0146	-0.0309	0.0223	-0.0042	-0.0017

**Tableau A5-5. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 3**



**Figure A5-5. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 3**

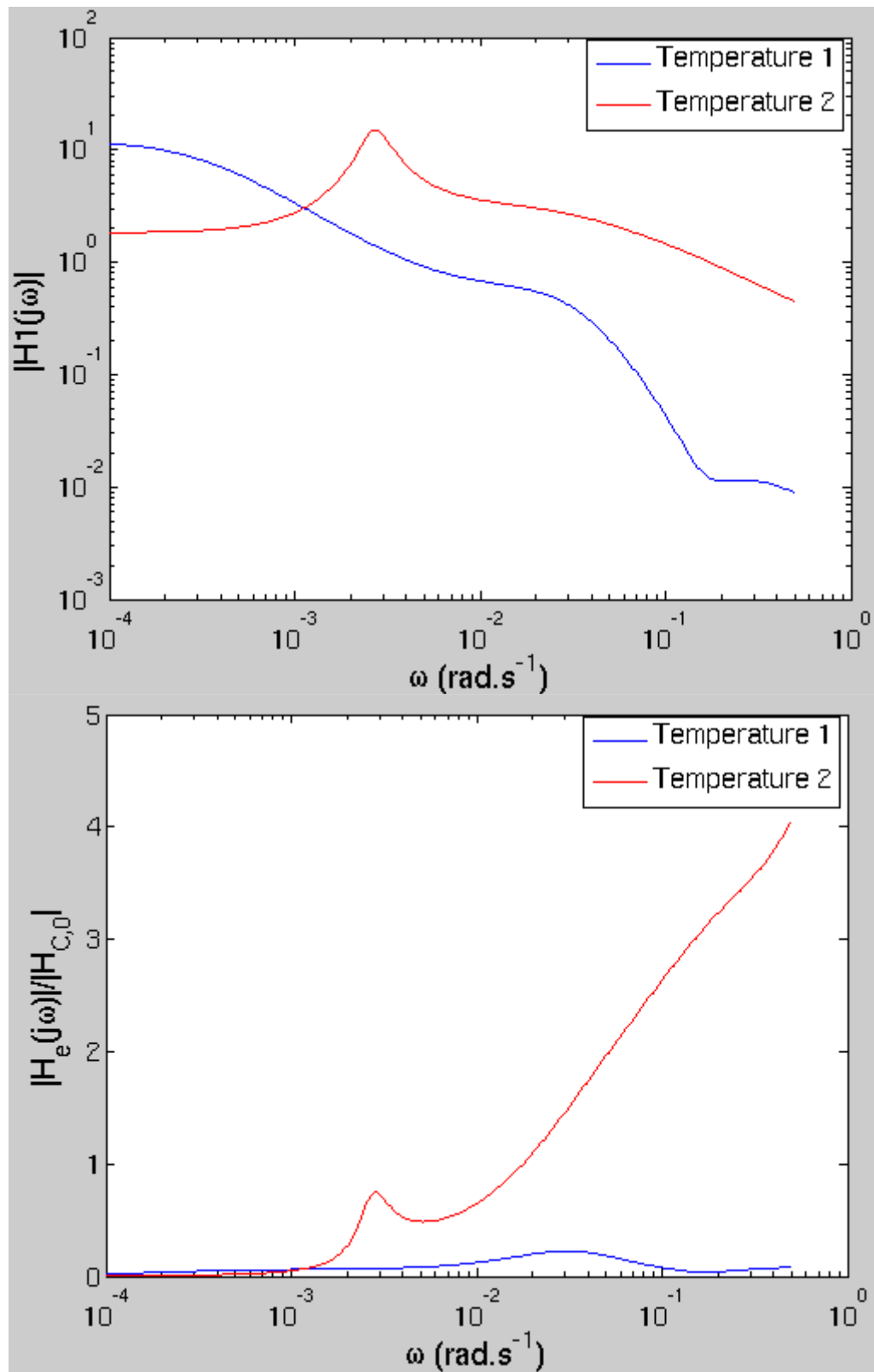


Figure A5-6. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarythmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 3

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	7.7	4.2
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	26.22	NA

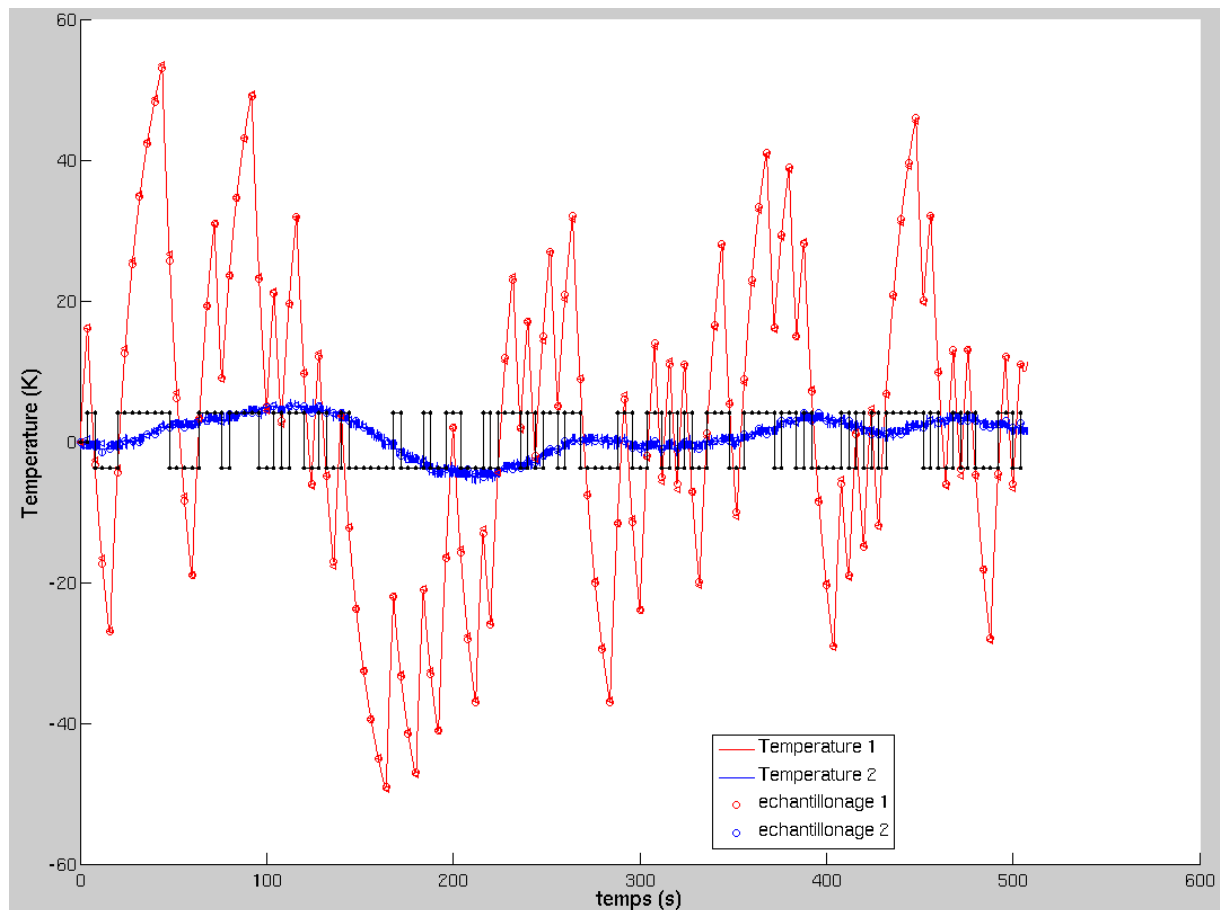
**Tableau A5-6. Temps caractéristiques pour la séquence 3**

- Pour l'échelon 4:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0052\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.4641	4.4449	-2.4981	0.5172	0.6335	-1.7232	1.5405	-0.4469	-0.0039
T2 ( $T_p$ )	-1.8183	-0.1381	1.7635	-0.8068	0.0149	-0.0175	-0.0044	0.0187	-0.0112

**Tableau A5-7. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 4**



**Figure A5-7. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 4**

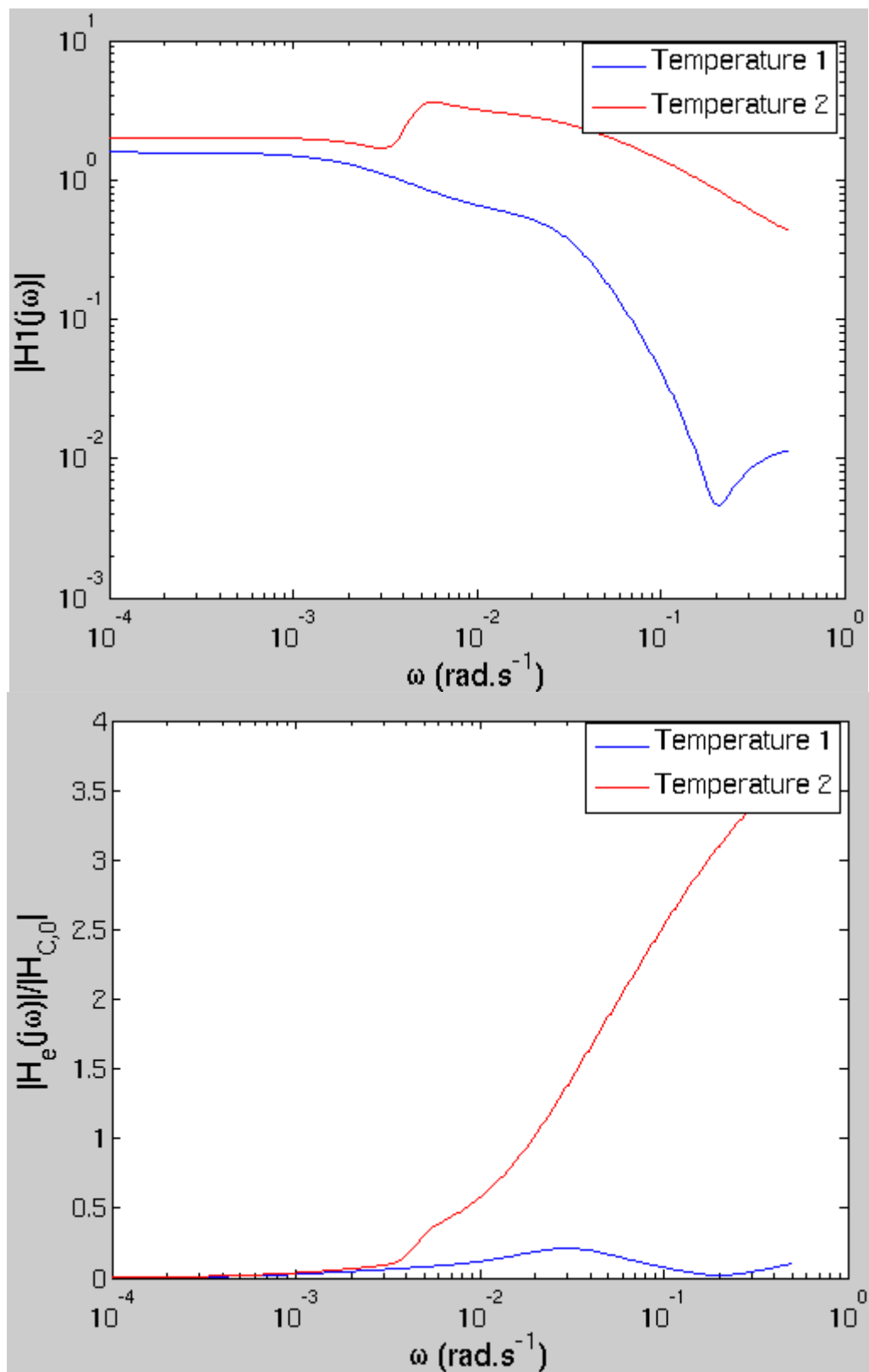


Figure A5-8. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 4

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	7.8	NA
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	25.7	NA

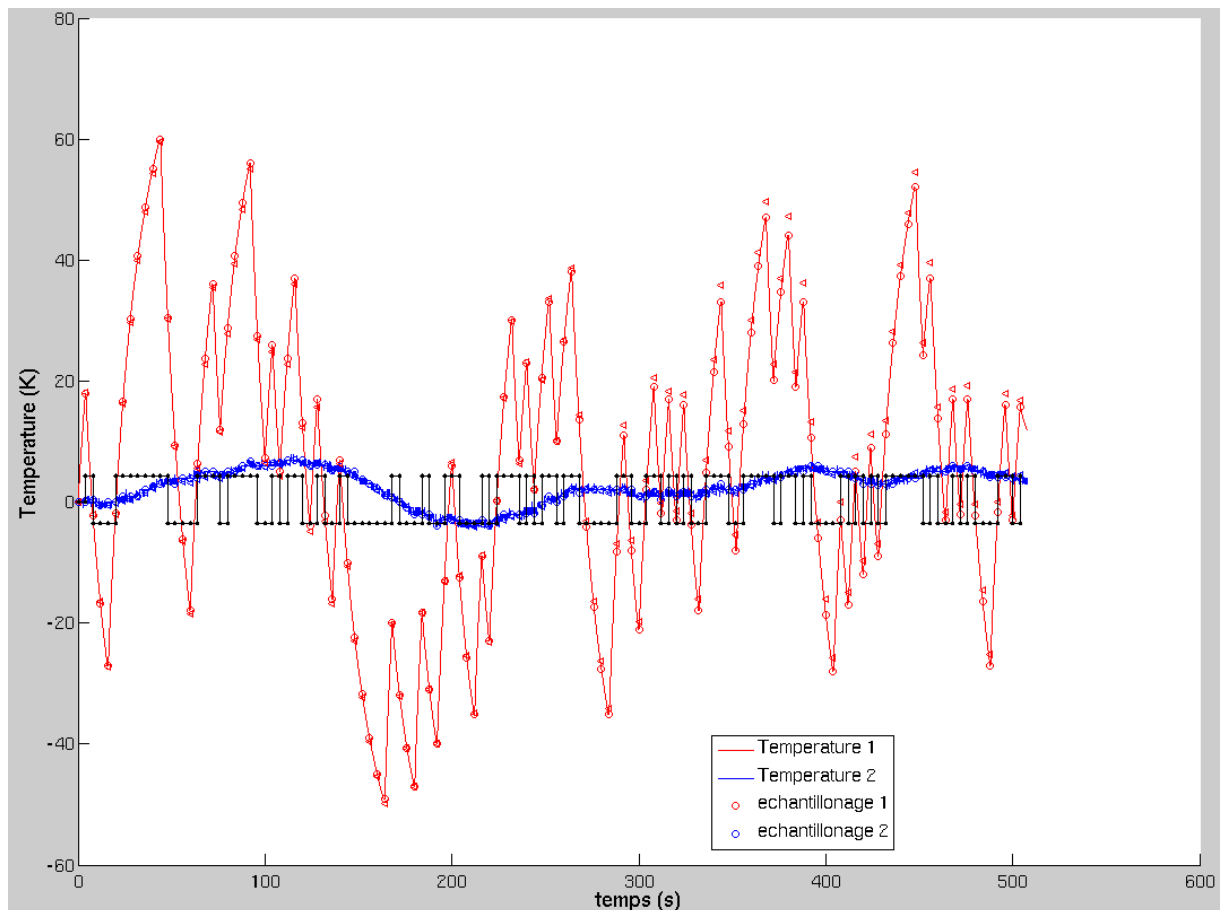
**Tableau A5-8. Temps caractéristiques pour la séquence 4**

- Pour l'échelon 5:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0053\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.53	4.6281	-2.6665	0.5684	0.6396	-1.7878	1.6575	-0.5120	0.0030
T2 ( $T_p$ )	-2.7162	2.3510	-0.5352	-0.0995	0.0158	-0.0253	0.0077	0.0067	-0.0045

**Tableau A5-9. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 5**



**Figure A5-9. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 5**

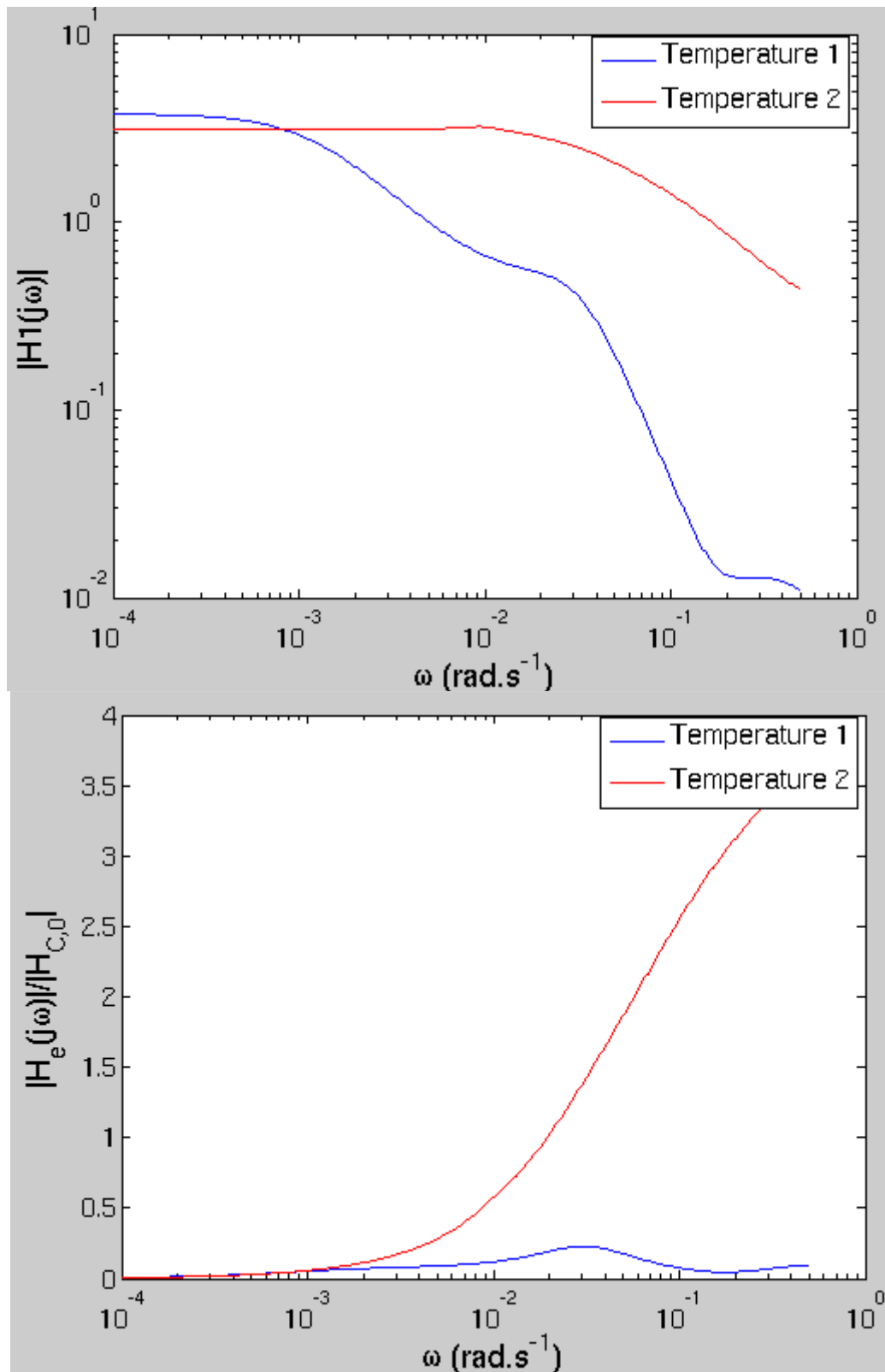


Figure A5-10. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 5

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	8.93	NA
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	28.56	NA

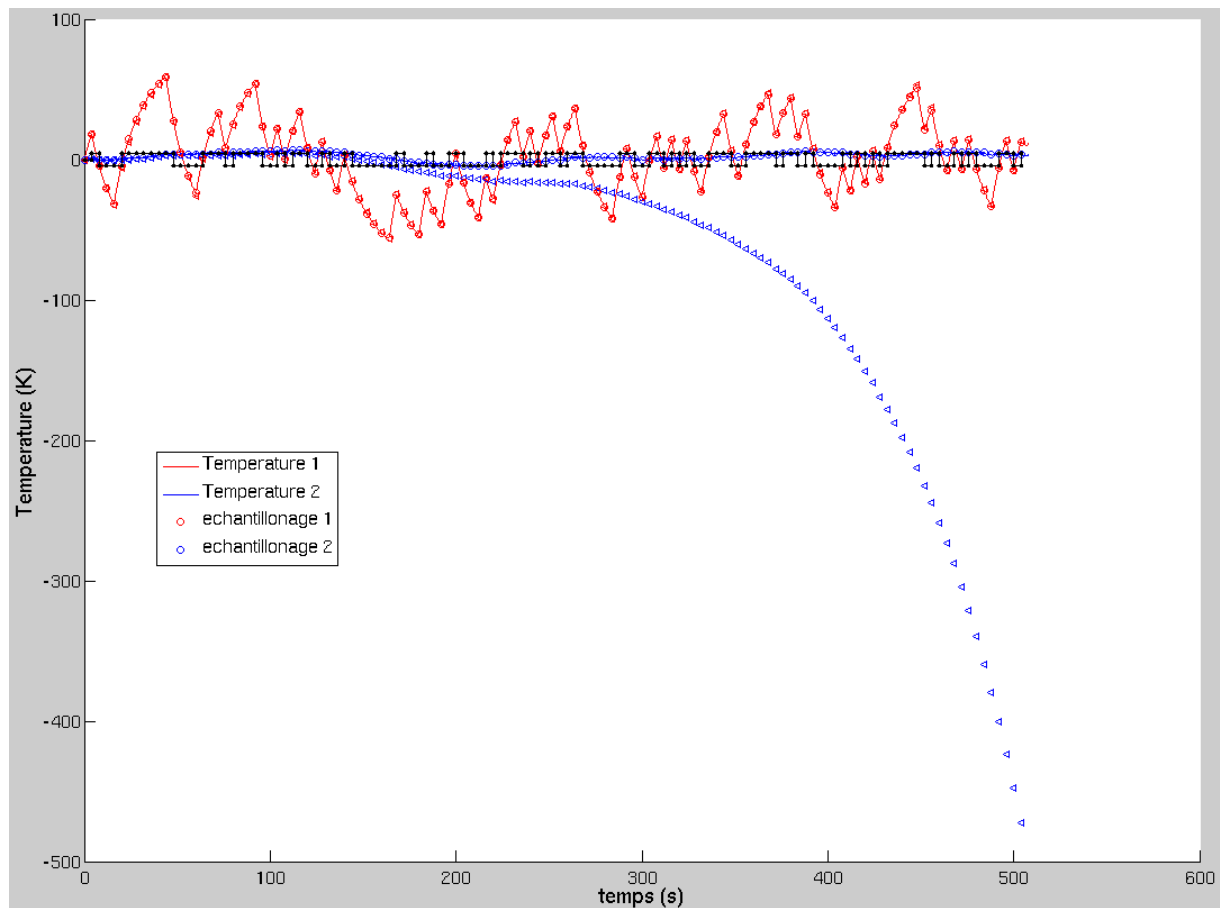
**Tableau A5-10. Temps caractéristiques pour la séquence 5**

- Pour l'échelon 6:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0051\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.6166	4.8703	-2.8917	0.6380	0.6233	-1.8015	1.7449	-0.5813	0.0146
T2 ( $T_p$ )	-3.8975	5.6962	-3.7008	0.9021	0.0151	-0.0479	0.0596	-0.0365	0.0096

**Tableau A5-11. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 6**



**Figure A5-11. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 6**



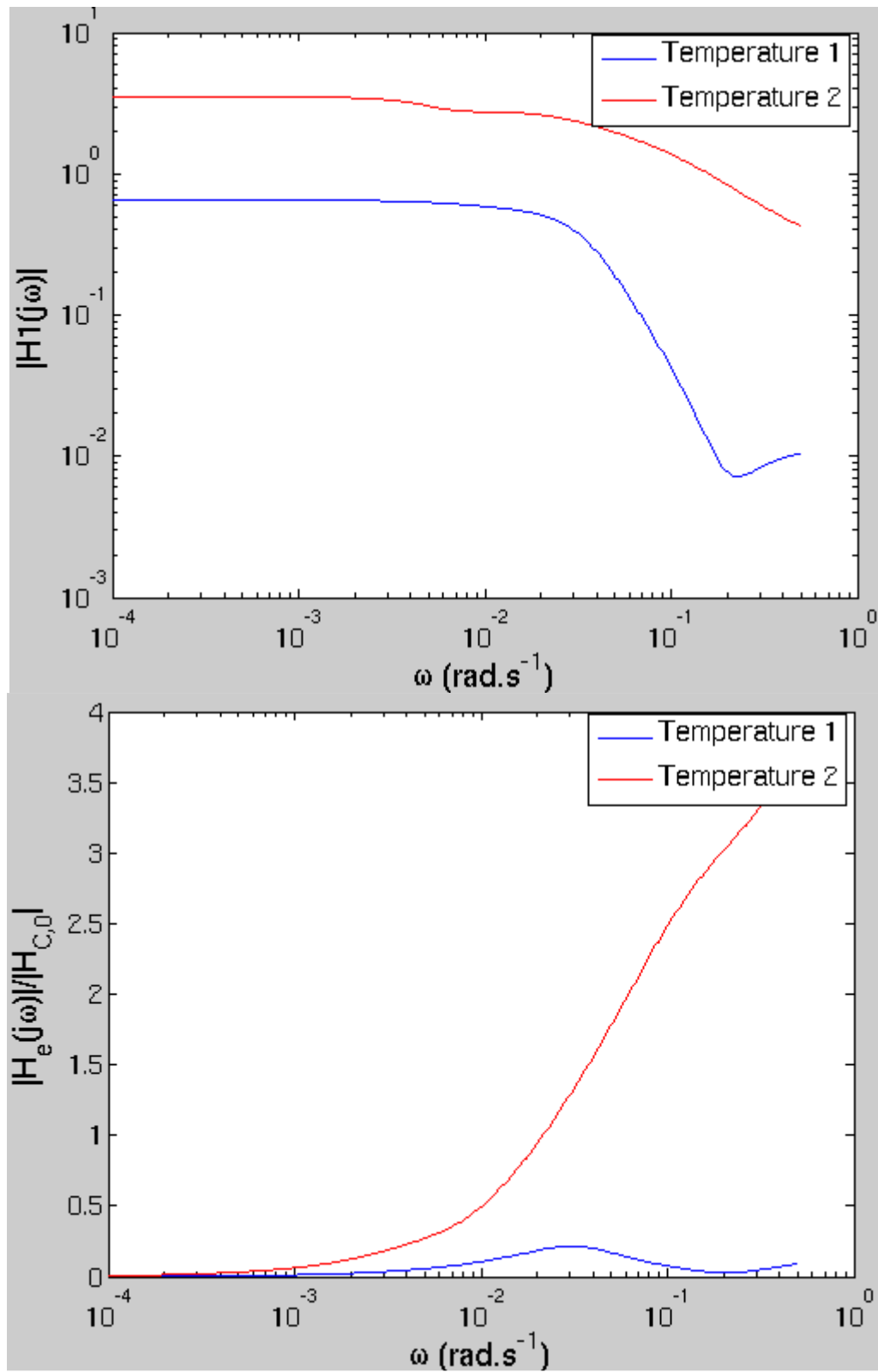


Figure A5-12. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 6

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	10.92	NA
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	34.56	NA

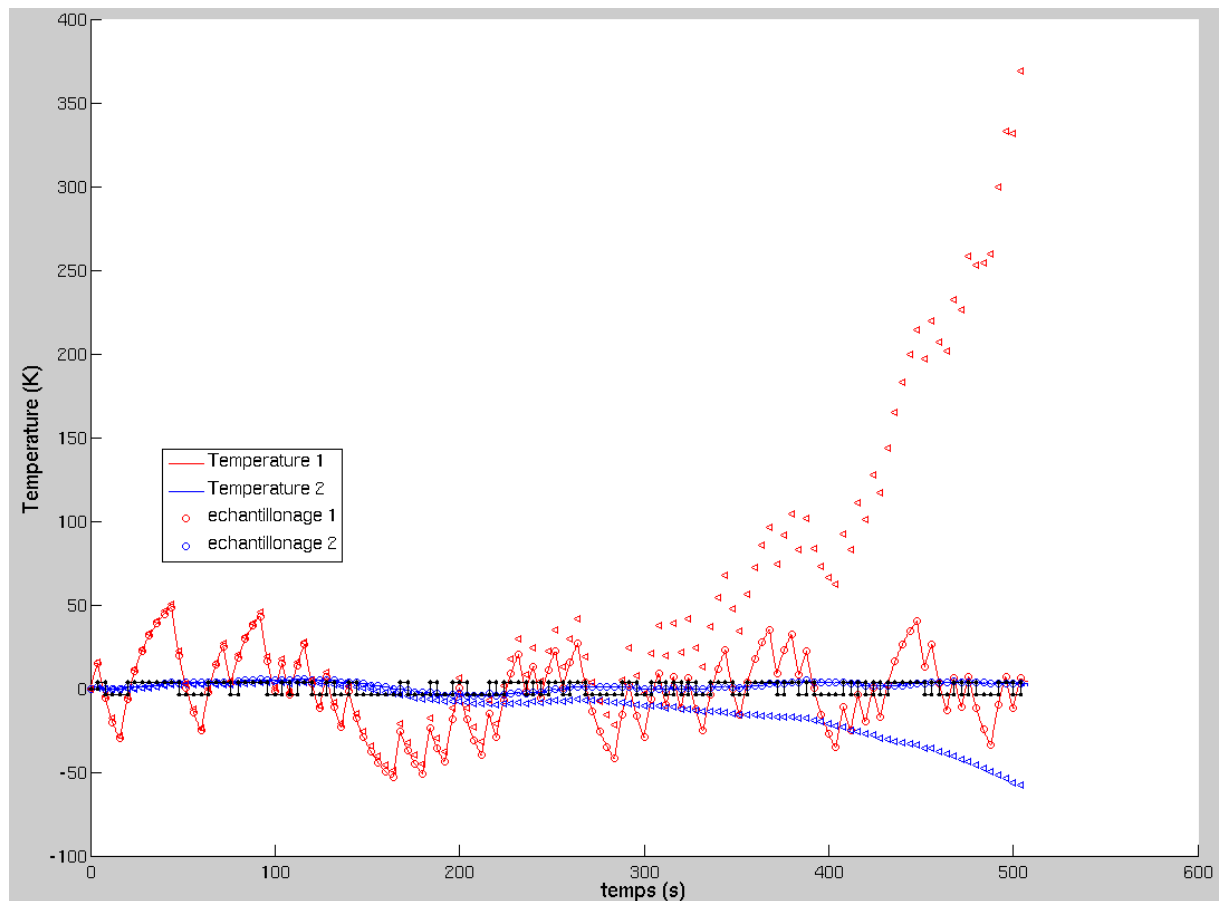
**Tableau A5-12. Temps caractéristiques pour la séquence 6**

- Pour l'échelon 7:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0052\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.7325	5.1919	-3.1874	0.7280	0.5997	-1.8096	1.8403	-0.6542	0.0239
T2 ( $T_p$ )	-3.8752	5.6343	-3.6439	0.8847	0.0148	-0.0461	0.0558	-0.0327	0.0082

**Tableau A5-13. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 7**



**Figure A5-13. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 7**

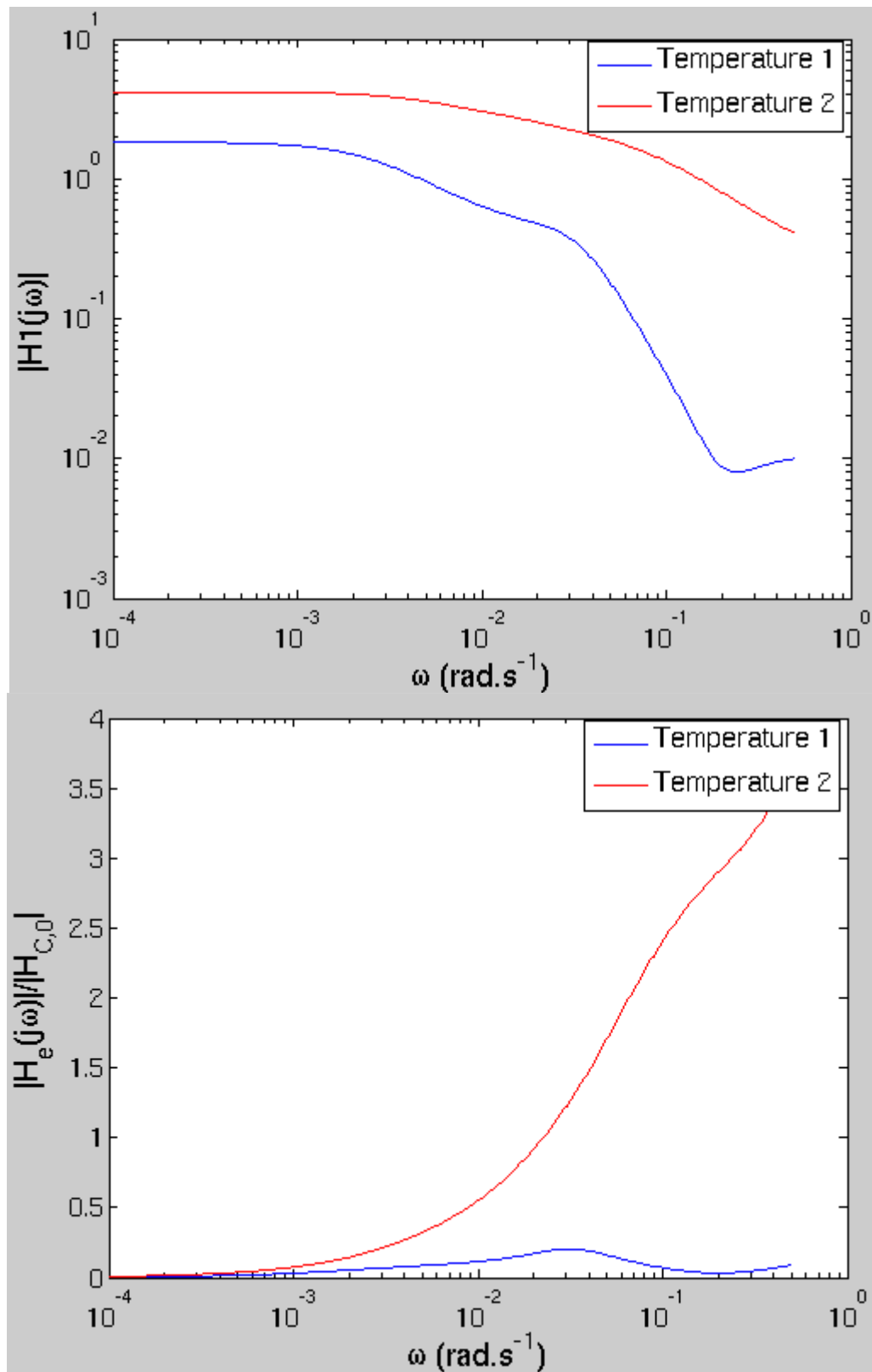


Figure A5-14. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarythmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 7

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	12.56	NA
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	54.77	NA

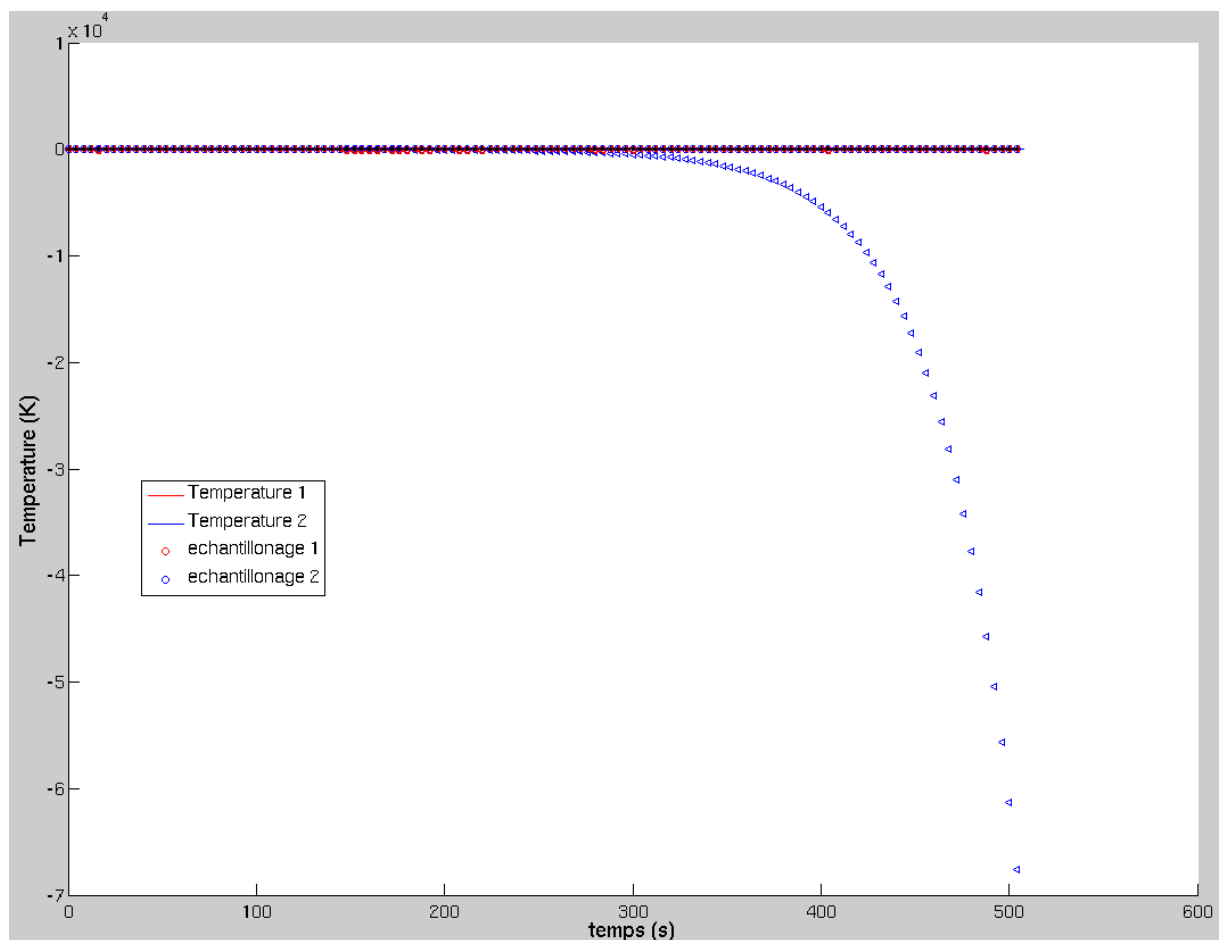
**Tableau A5-14. Temps caractéristiques pour la séquence 7**

- Pour l'échelon 8:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0053\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.5216	4.5983	-2.6337	0.5570	0.6059	-1.6999	1.5807	-0.4910	0.0043
T2 ( $T_p$ )	-3.9492	5.8450	-3.8439	0.9482	0.0177	-0.0585	0.0746	-0.0453	0.0115

**Tableau A5-15. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 8**



**Figure A5-15. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 8**

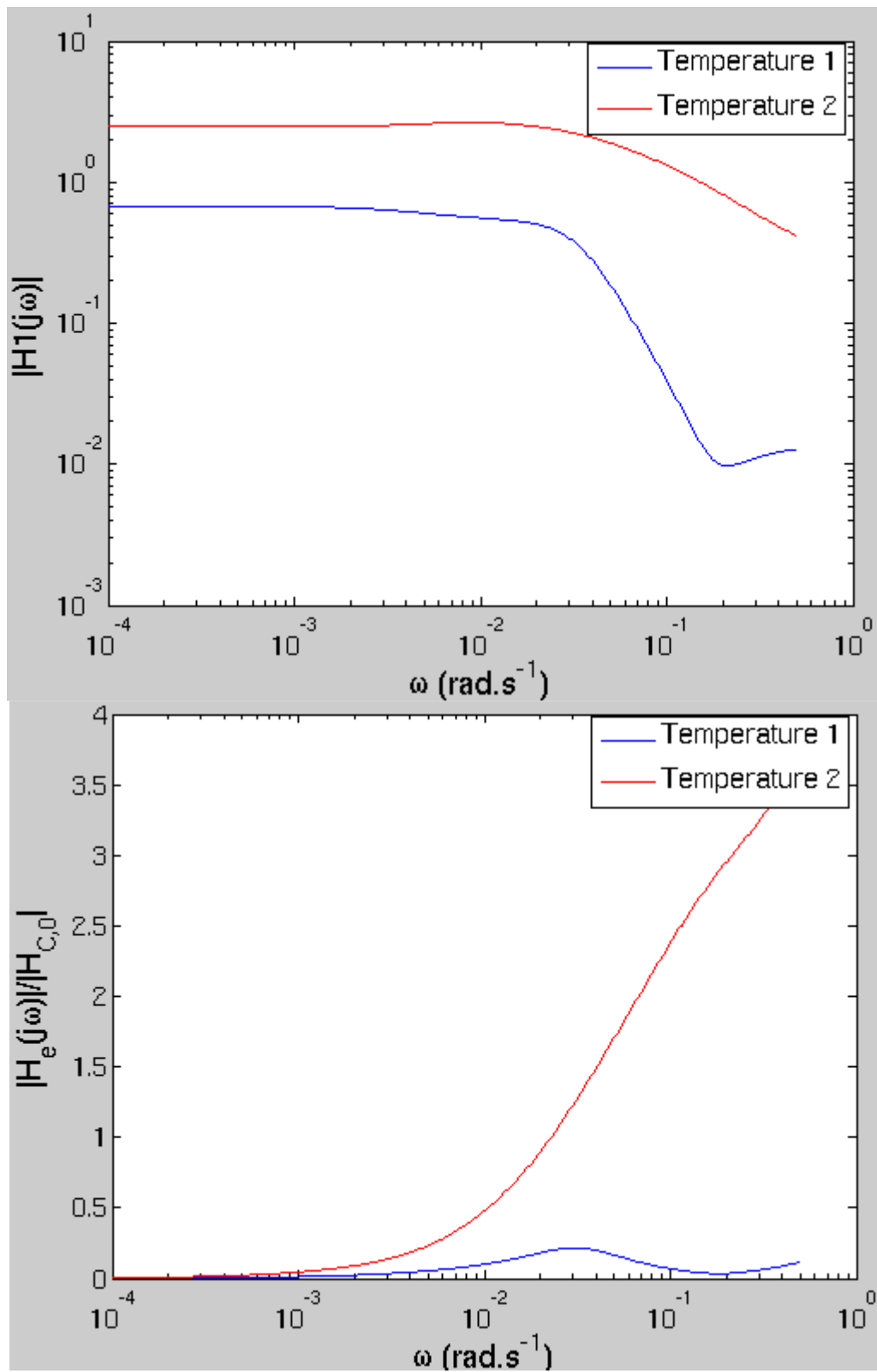


Figure A5-16. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 8

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	8.51	NA
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	25.46	NA

**Tableau A5-16. Temps caractéristiques pour la séquence 8**

Comment on peut voir sur les résultats, pour l'identification seulement les échelons 3, 4 et 5 marchent bien. Pour l'étude des propriétés thermophysiques, le programme n'est pas capable de donner valeurs numériques pour la grande divergence existant dans l'algorithme de Gauss-Seidel.

## Annexe 6

### Analyse des résultats des mesures de Pascal Schetelat

Ces mesures ont été réalisées dans le cadre de programme ITheC avec les valeurs de création du bruit blanc suivantes:

	n	k	Ts (s)
Haute fréquence	7	1	4

La valeur de l'intensité du courant électrique mesurée dans l'inducteur est représentée sur la figure A6-1

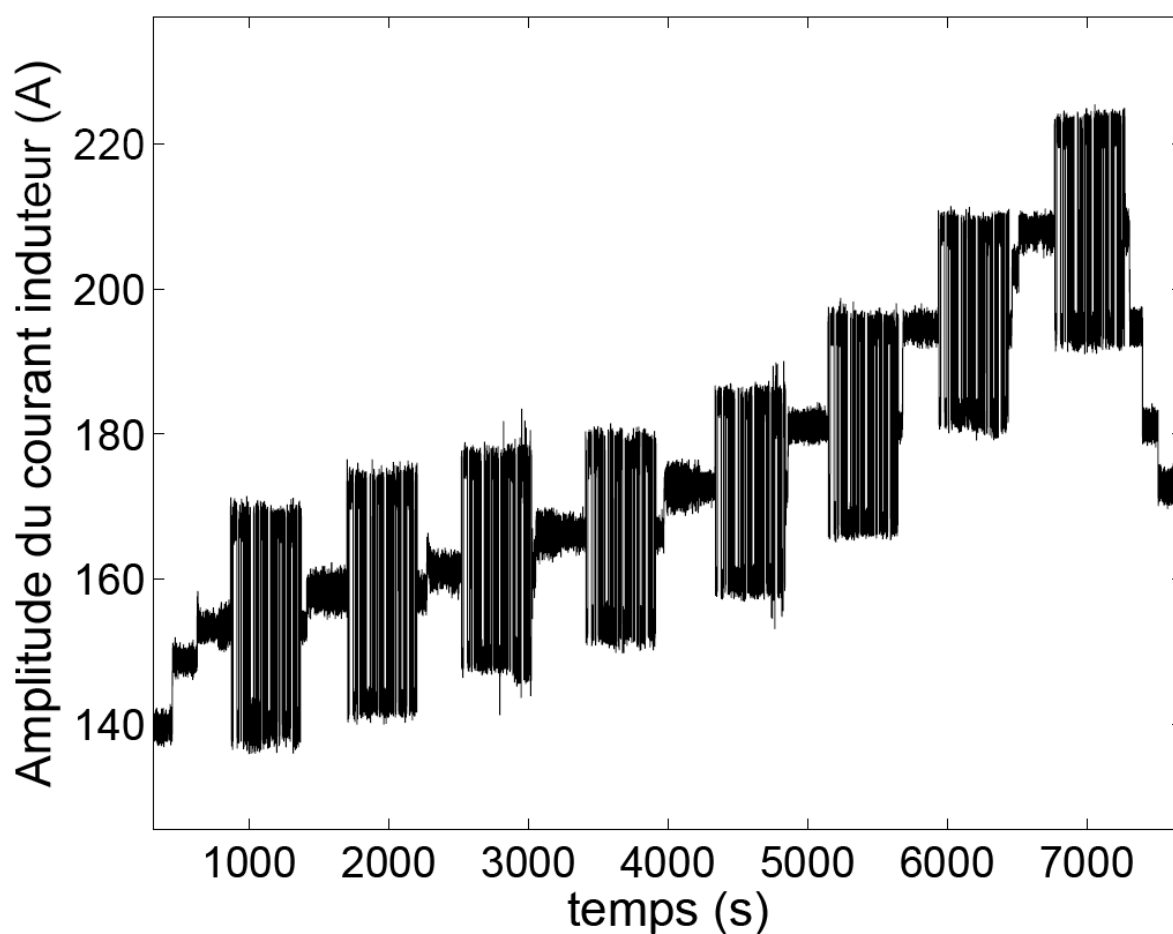


Figure A6-1. Variation temporelle de l'intensité du courant inducteur

Les températures polaires (température 1) et équatoriale (température 2) sont mesurées par des pyromètres et portés sur la figure A6-2.

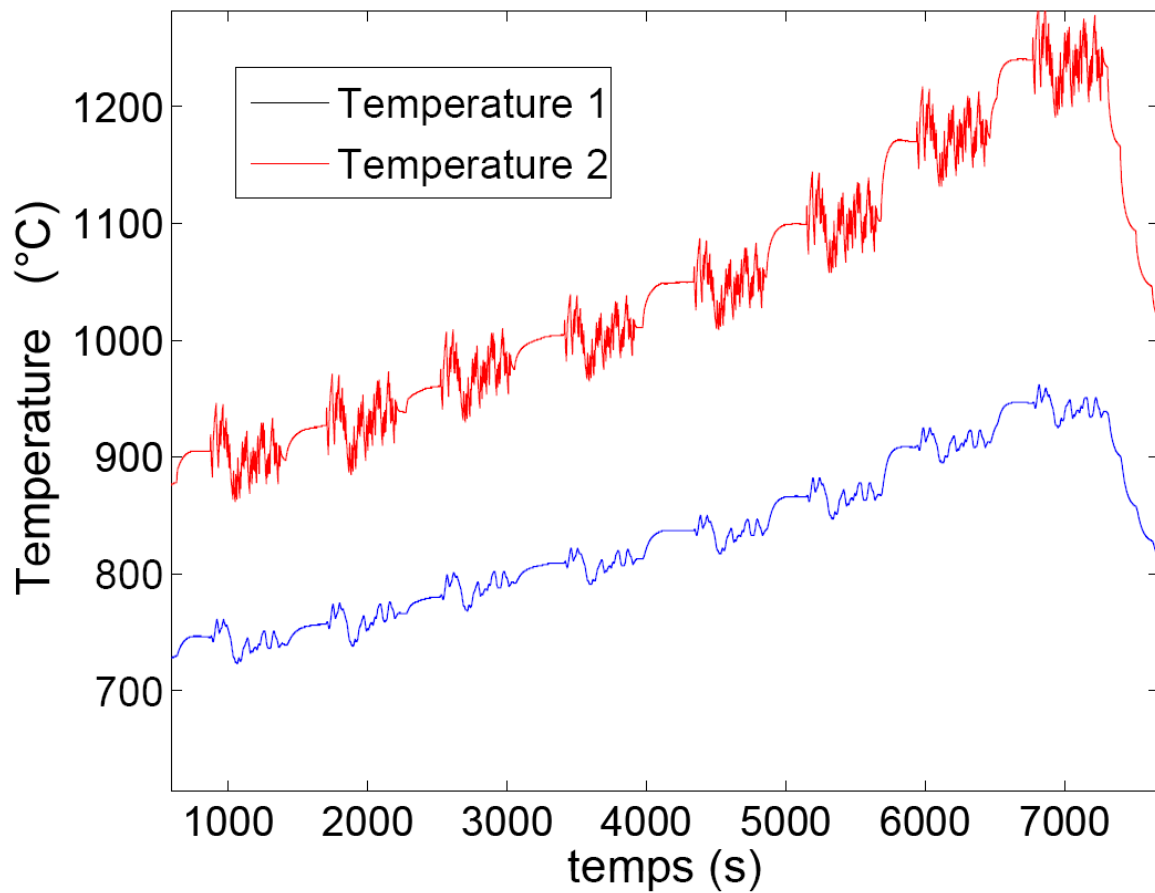


Figure A6-2. Variation temporelle des températures mesurées

Les valeurs moyennes des valeurs portées sur figures A6-1 et A6-2 sont reportées dans le tableau A6-1 pour chacun des échelons.

Echelon	Amplitude du courant (A)	Amplitude de modulation (%)	T <sub>e</sub> (°C)	T <sub>p</sub> (°C)
1	153	10	905	745
2	158	10	927	757
3	162	9	961	780
4	166	8	1005	809
5	173	8	1050	837
6	181	8	1099	866
7	195	7	1170	909
8	208	7	1240	946

Tableau A6-1. Tableau des mesures moyennes relatives au Niobium sur l'expérience de P. Schetelat

Pour le 5<sup>ème</sup> échelon, Pascal Schetelat a donné les résultats suivants:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0046\Omega$

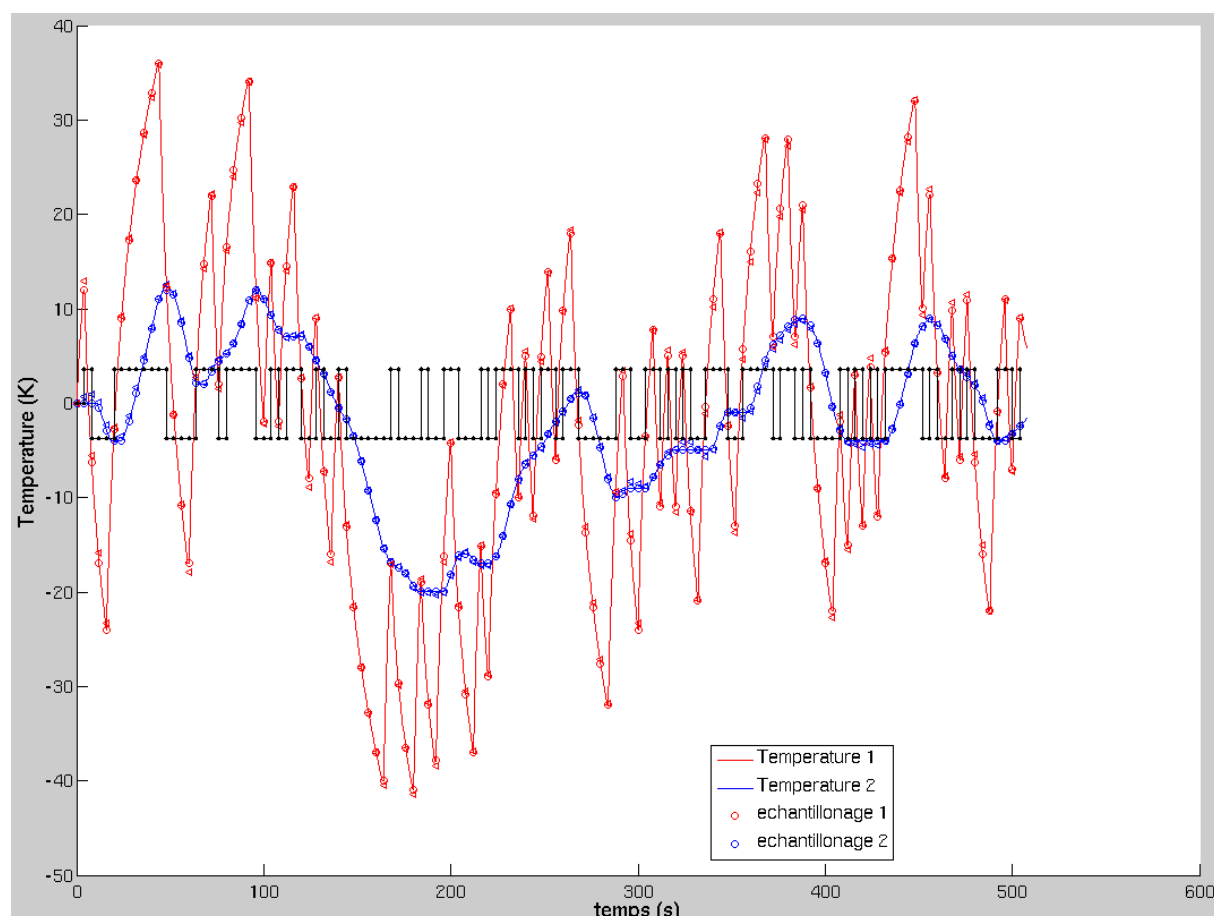


Valeurs des paramètres des polynômes d'identifications.

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.4174	4.3172	-2.3809	0.4810	0.6592	-1.8470	1.7585	-0.6063	0.0355
T2 ( $T_p$ )	-3.4342	4.3488	-2.3950	0.4804	0.0361	-0.0368	-0.0111	-0.0116	0.0232

**Tableau A6-2. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 5**

La figure A6-3 montre que les polynômes d'identification calculés sont de bonne qualité. En effet, les valeurs des températures identifiées et mesurées sont semblables.



**Figure A6-3. Comparason des valeurs des températures mesurées et identifiées. En noir est portée la forme du signal de consigne qui pilote la générateur de puissance.**

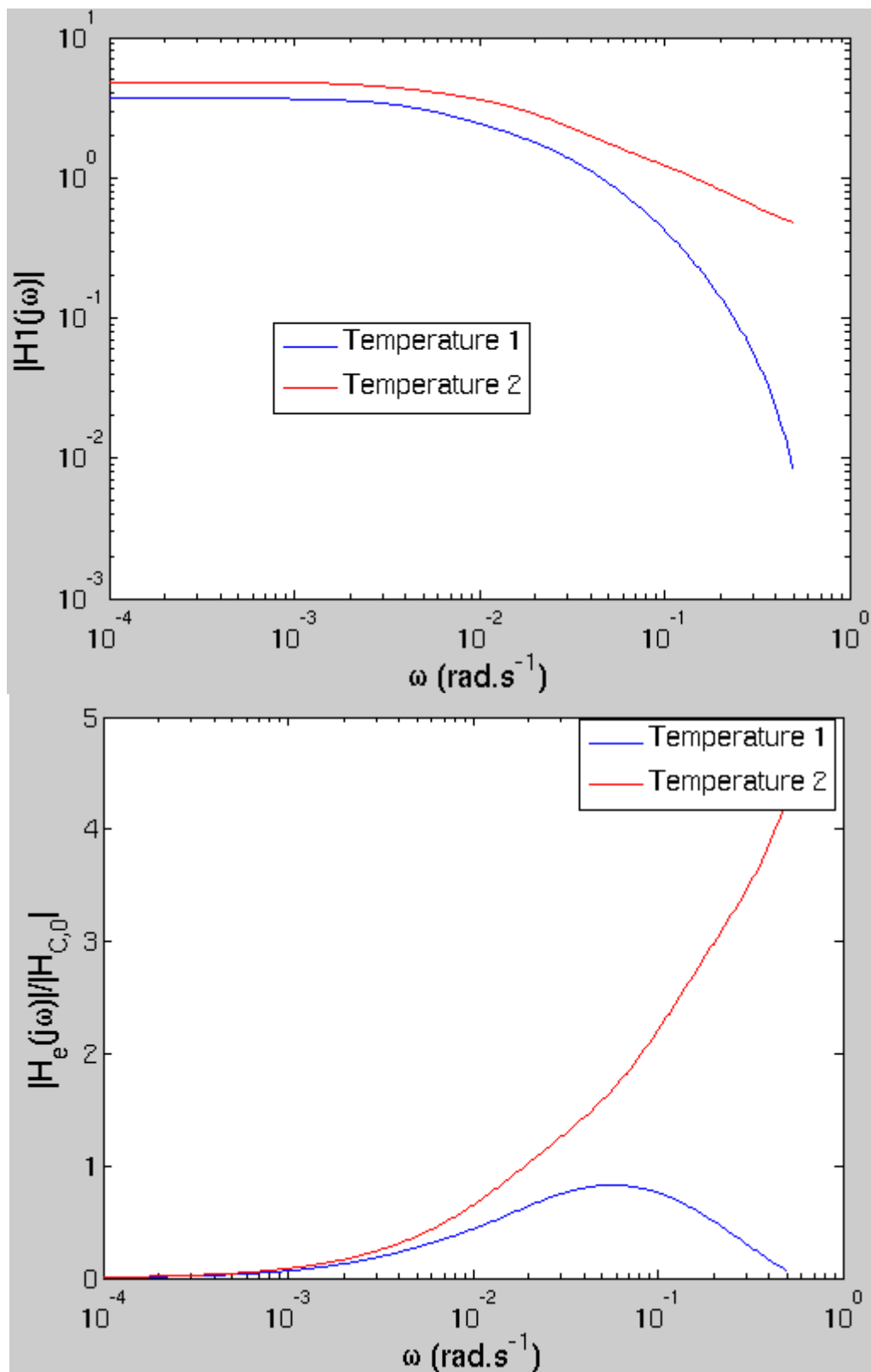


Figure A6-4. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarythmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 5

Les temps caractéristiques des transferts internes et externes sont portés dans le tableau A6-2. On voit que les temps donnés par les deux fonctions de transferts sont proches.

	Hp	He
$\tau_{\text{int}} \text{ (s)}$	6.82	6.36
$\tau_{\text{ext}} \text{ (s)}$	41.73	40.64

**Tableau A6-3. Valeurs des temps de transferts interne et externe donnés par les fonctions de transferts He et Hp à la séquence 5**

Les valeurs physiques données par la résolution du système proposé par P. Schetelat sont portées dans le tableau A6.3.

$s_e$	0.06
$g_e$	0.11
$h_{\text{ext}} \text{ (W} \cdot \text{K}^{-1})$	0.4547
$h_{\text{int}} \text{ (W} \cdot \text{K}^{-1})$	1.398
$C_p \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1})$	20.74
Bi	0.325

**Tableau A6-4. Valeur des paramètres physiques de l'échantillon lorsqu'il est dans l'état correspondant à la séquence 5.**

J'ai analysé avec le programme Matlab de Pascal Schetelat, tous les échelons qu'il avait réalisés. Les valeurs suivantes ont été trouvées.

- Pour l'échelon 1:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0039\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.8768	5.5967	-3.5634	0.8435	0.6524	-2.1302	2.4311	-1.0865	0.1333
T2 ( $T_p$ )	-3.5423	4.6588	-2.6909	0.5744	0.0263	-0.0092	-0.0506	0.0225	0.0111

**Tableau A6-5. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 1**

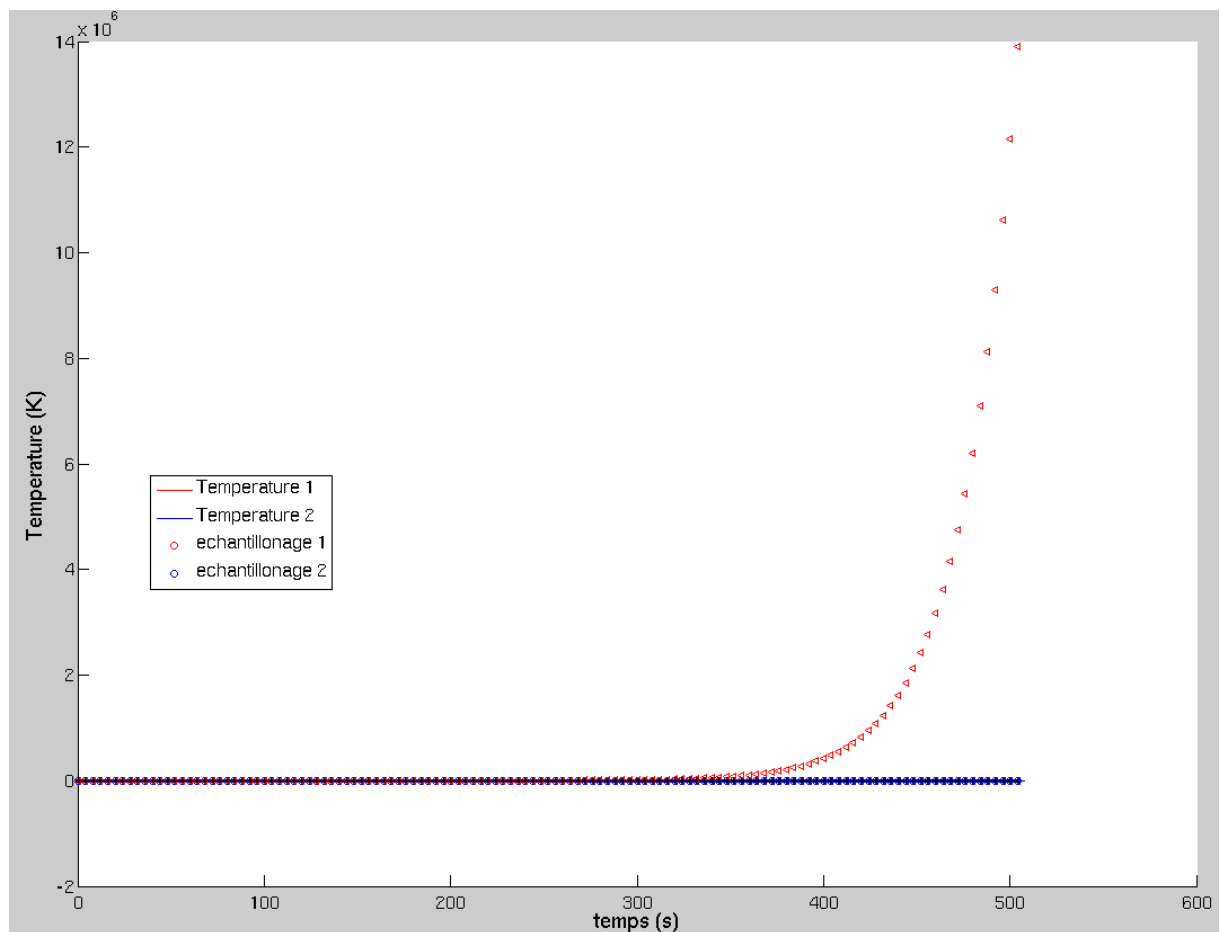
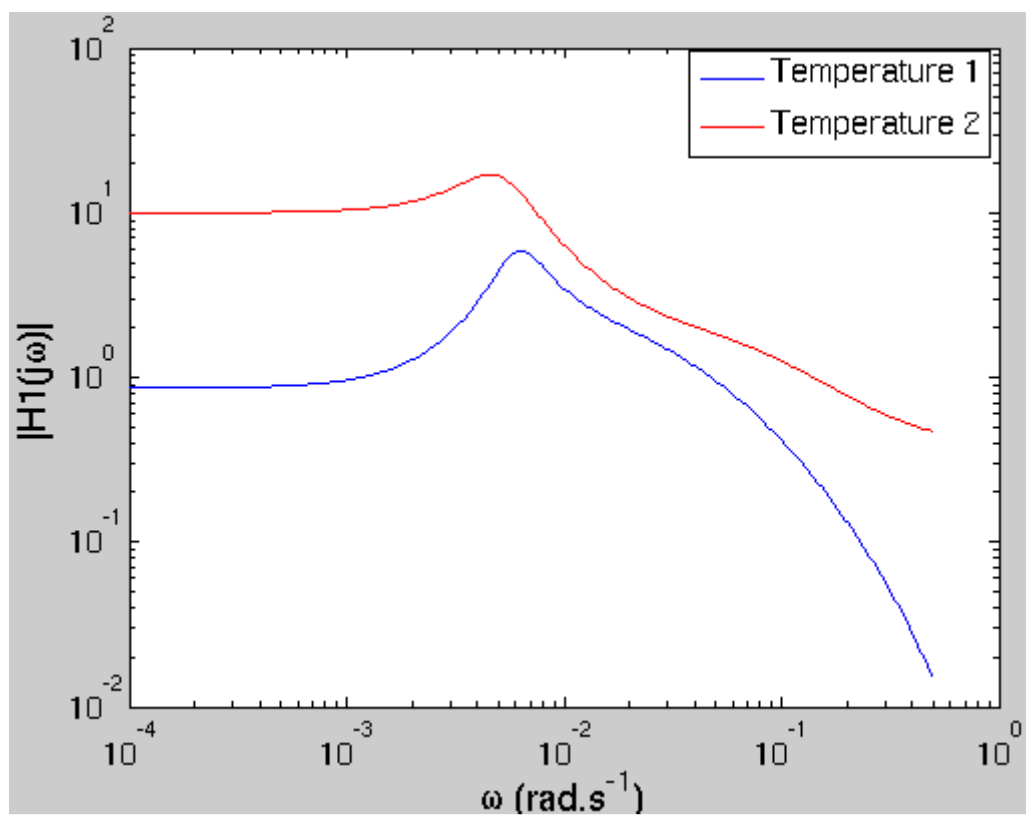


Figure A6-5. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 1



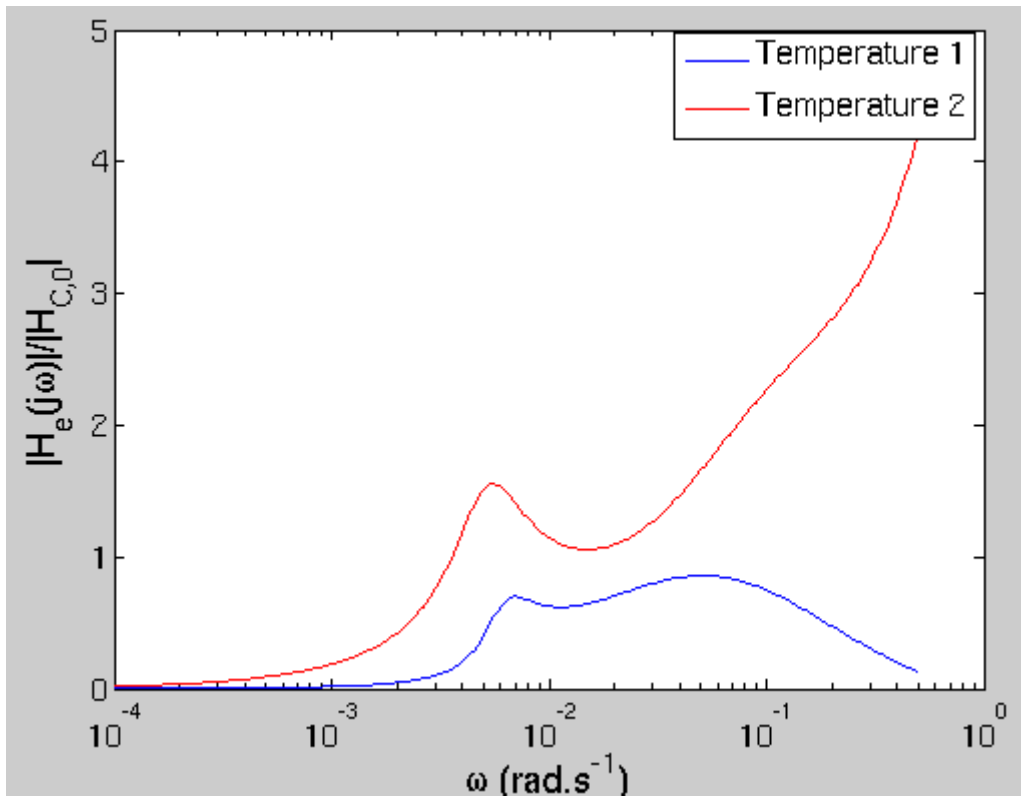


Figure A6-6. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarythmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 1

	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
T <sub>int</sub> (s)	8.67	13.87
T <sub>ext</sub> (s)	37.44	NA

Tableau A6-6. Temps caractéristiques pour la séquence 1

S <sub>e</sub>	Inf
g <sub>e</sub>	-0.001
h <sub>ext</sub> (W · K <sup>-1</sup> )	0
h <sub>int</sub> (W · K <sup>-1</sup> )	55.98
C <sub>p</sub> (J · kg <sup>-1</sup> )	21.0071 (valeur recherchée = 20.74)
Bi	0

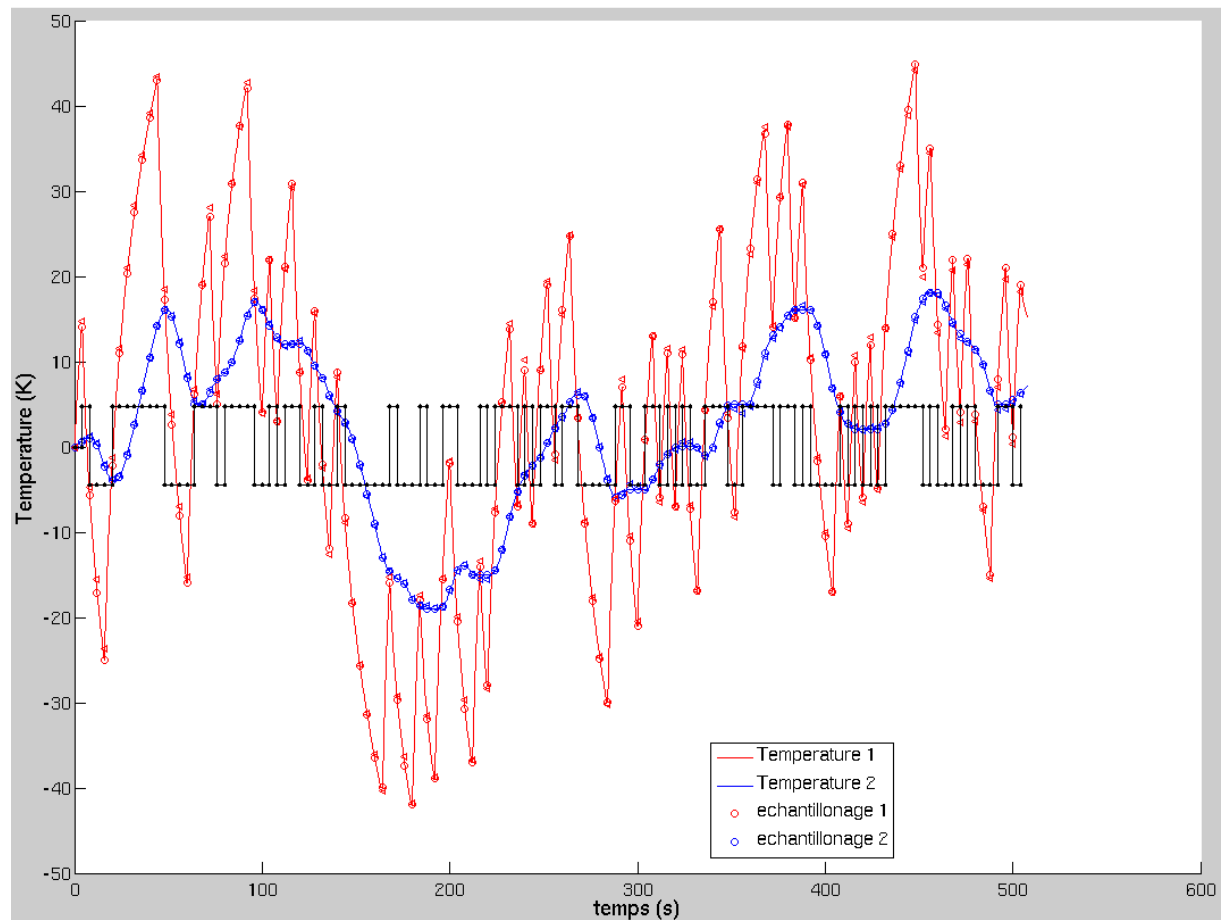
Tableau A6-7. Valeur des paramètres physiques de l'échantillon lorsqu'il est dans l'état correspondant à la séquence 1

- Pour l'échelon 2:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0039\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.5798	4.7465	-2.7542	0.5876	0.6739	-1.9904	2.0118	-0.7529	0.0578
T2 ( $T_p$ )	-3.5335	4.5987	-2.5987	0.5336	0.0363	-0.0354	-0.0194	-0.0081	0.0267

**Tableau A6-8. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 2**



**Figure A6-7. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 2**

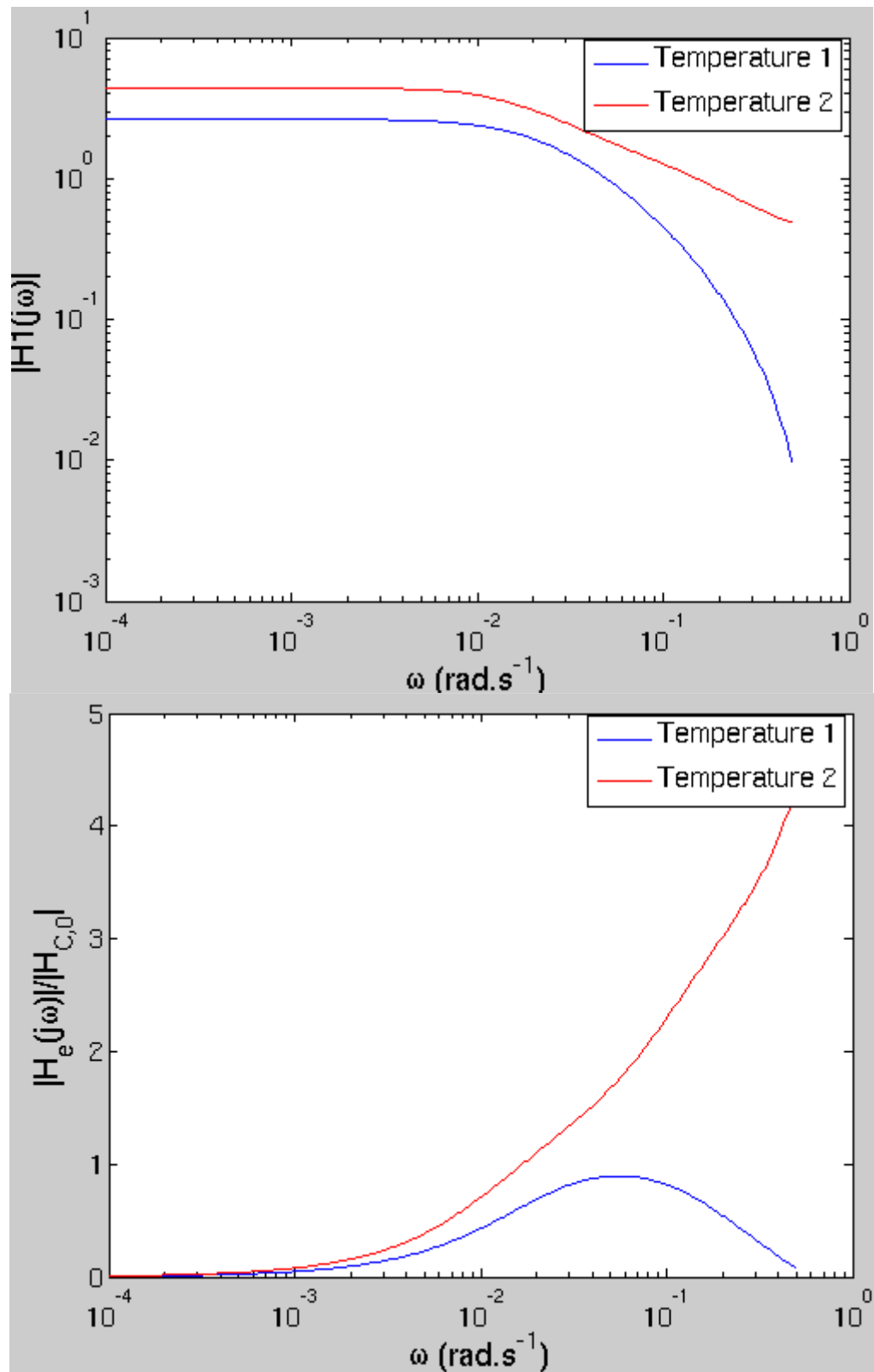


Figure A6-8. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 2

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	7.8907	6.4723
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	54.15	45.5264

**Tableau A6-9. Temps caractéristiques pour la séquence 2**

$S_e$	1.2614
$g_e$	2.1756
$h_{\text{ext}} \text{ (W} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$	0.2116
$h_{\text{int}} \text{ (W} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$	-0.0961
$C_p \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$	3.6532 (valeur recherchée = 20.74)
$Bi$	-2.2014

**Tableau A6-10. Valeur des paramètres physiques de l'échantillon lorsqu'il est dans l'état correspondant à la séquence 2**

- Pour l'échelon 3:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.004\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.5363	4.632	-2.6555	0.5596	0.6562	-1.909	1.8993	-0.6977	0.0513
T2 ( $T_p$ )	-3.4911	4.5013	-2.5297	0.5195	0.0385	-0.0422	-0.0107	-0.0076	0.022

**Tableau A6-11. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 3**



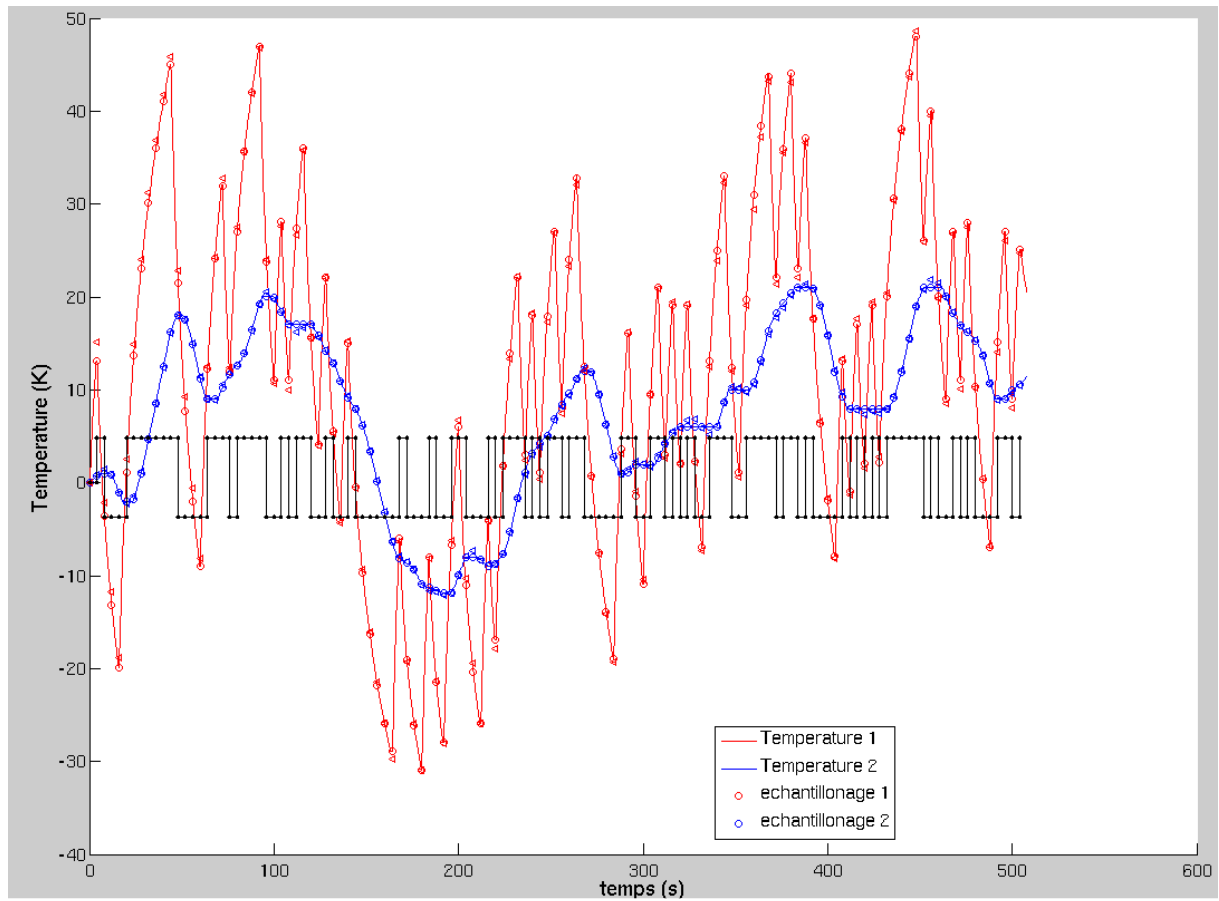
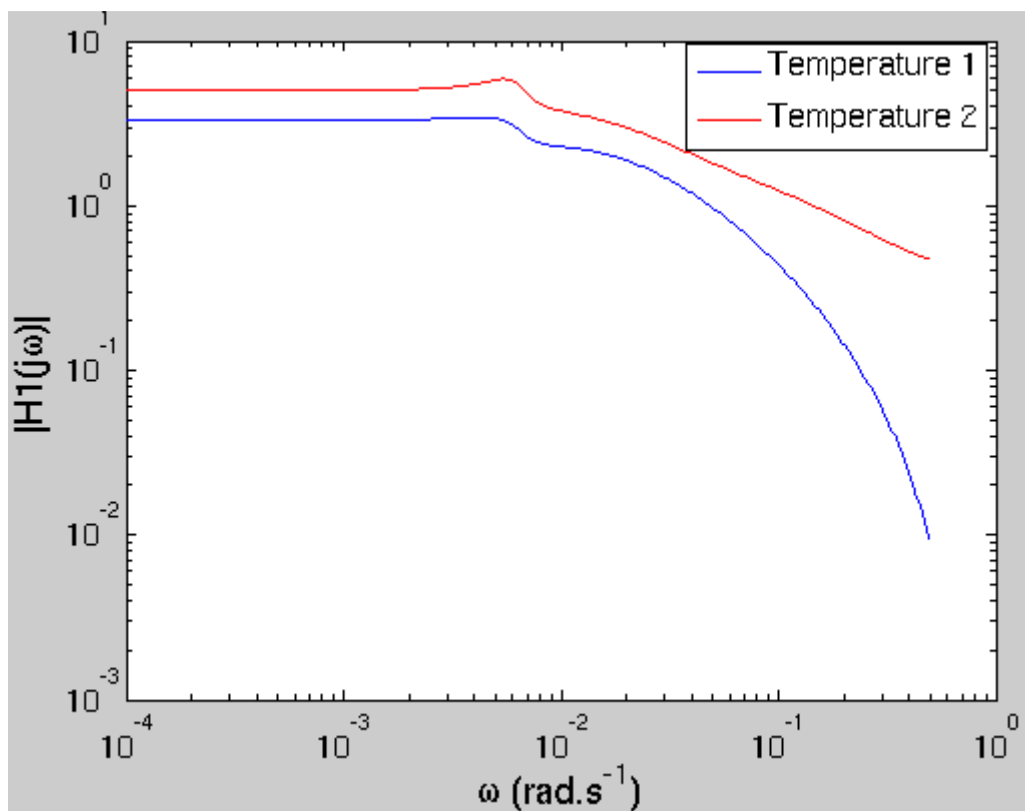


Figure A6-9. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 3



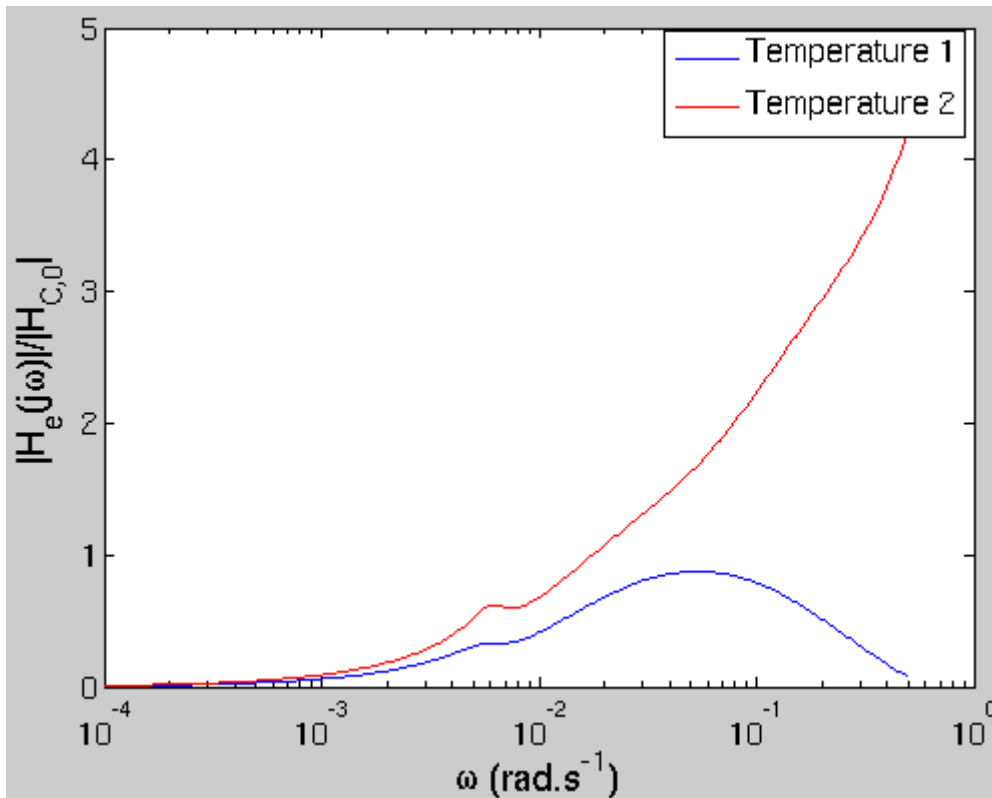


Figure A6-10. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 3

	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
T <sub>int</sub> (s)	7.68	6.81
T <sub>ext</sub> (s)	55.37	47.89

Tableau A6-12. Temps caractéristiques pour la séquence 3

S <sub>e</sub>	1.4168
g <sub>e</sub>	-377.2718
h <sub>ext</sub> (W · K <sup>-1</sup> )	0.2169
h <sub>int</sub> (W · K <sup>-1</sup> )	-0.1746
C <sub>p</sub> (J · kg <sup>-1</sup> )	-0.0240 (valeur recherchée = 20.74)
Bi	-1.2422

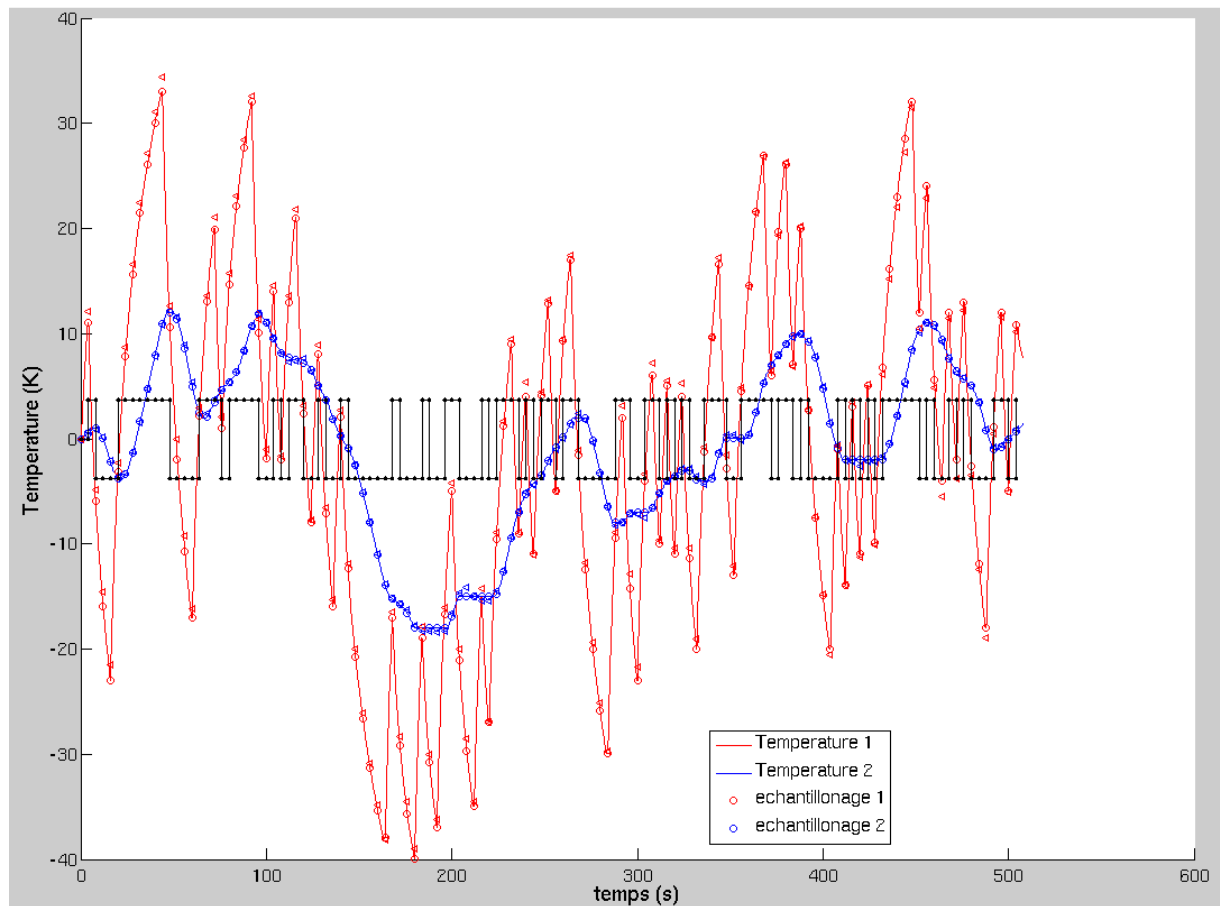
Tableau A6-13. Valeur des paramètres physiques de l'échantillon lorsqu'il est dans l'état correspondant à la séquence 3

- Pour l'échelon 4:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0044\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.5195	4.5797	-2.6017	0.5415	0.6503	-1.8847	1.8587	-0.6679	0.0436
T2 ( $T_p$ )	-3.4527	4.4059	-2.4535	0.5003	0.0353	-0.0347	-0.013	-0.0103	0.0226

**Tableau A6-14. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 4**



**Figure A6-11. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 4**

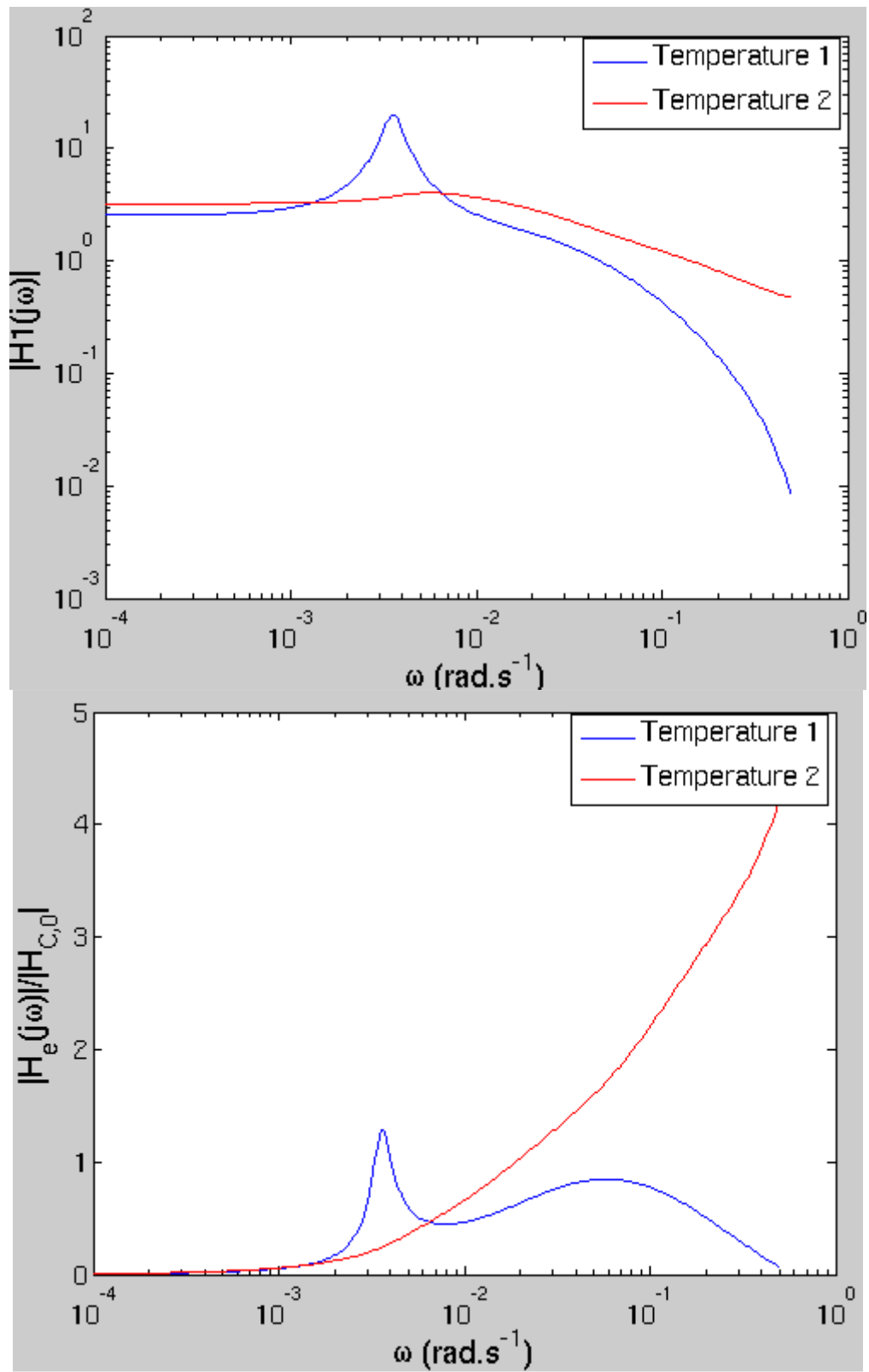


Figure A6-12. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 4

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	7.19	6.9
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	47.91	36.44

**Tableau A6-15. Temps caractéristiques pour la séquence 4**

$S_e$	Inf
$g_e$	-0.0306
$h_{\text{ext}} \text{ (W} \cdot \text{K}^{-1})$	0
$h_{\text{int}} \text{ (W} \cdot \text{K}^{-1})$	-8.3427
$C_p \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1})$	13.7155 (valeur recherchée = 20.74)
Bi	0

**Tableau A6-16. Valeur des paramètres physiques de l'échantillon lorsqu'il est dans l'état correspondant à la séquence 4**

- Pour l'échelon 6:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0047\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.4418	4.3766	-2.427	0.4922	0.6774	-1.9194	1.8467	-0.6426	0.0379
T2 ( $T_p$ )	-3.4749	4.4499	-2.4764	0.5014	0.0357	-0.0359	-0.0166	-0.0055	0.0223

**Tableau A6-17. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 6**

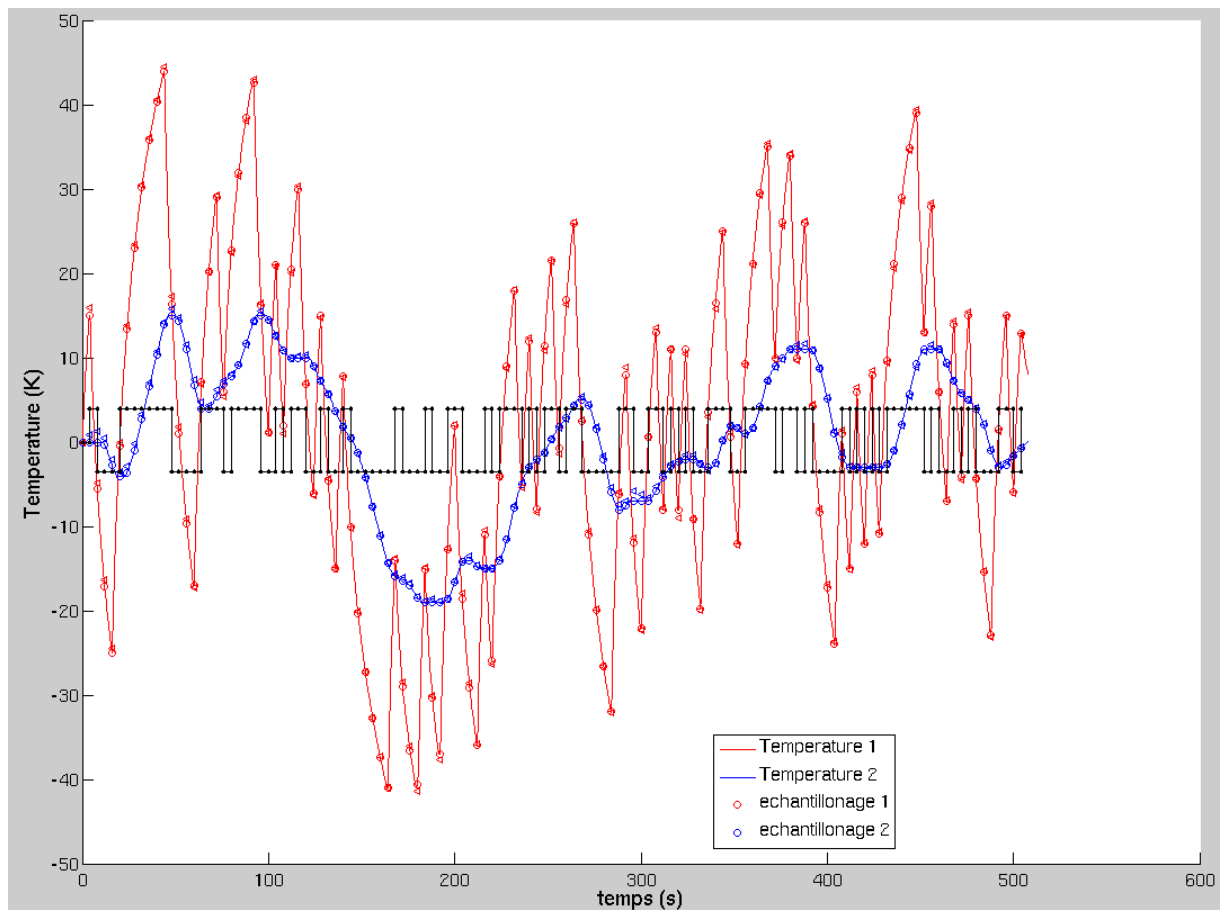
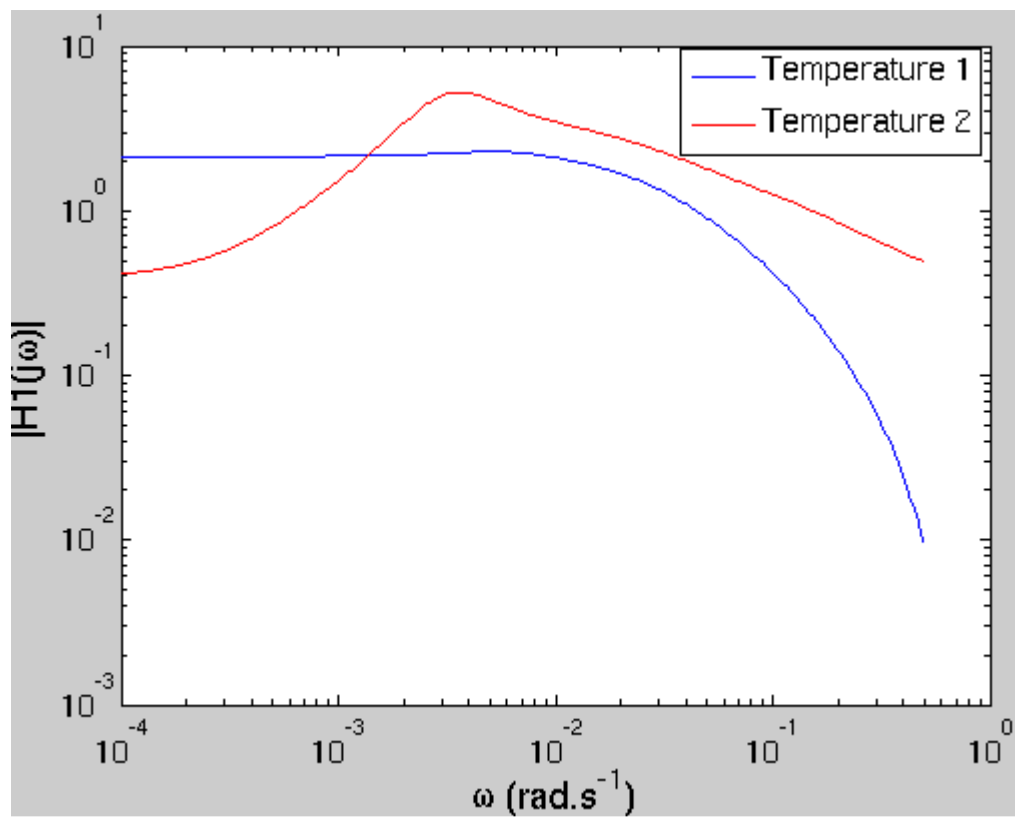


Figure A6-13. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 6



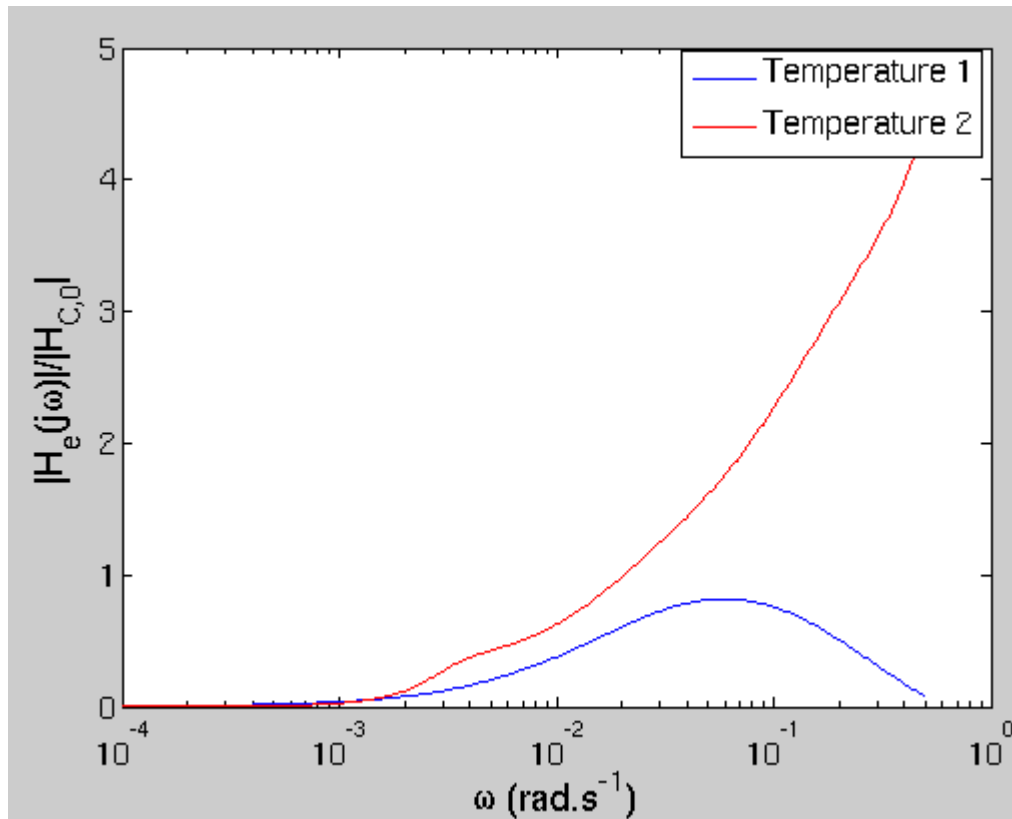


Figure A6-14. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 6

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	6.74	6.4
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	39.17	39.88

Tableau A6-18. Temps caractéristiques pour la séquence 6

$s_e$	Inf
$g_e$	0.0082
$h_{\text{ext}} \text{ (W} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$	0
$h_{\text{int}} \text{ (W} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$	12.2
$C_p \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$	22.77 (valeur recherchée = 20.74)
Bi	0

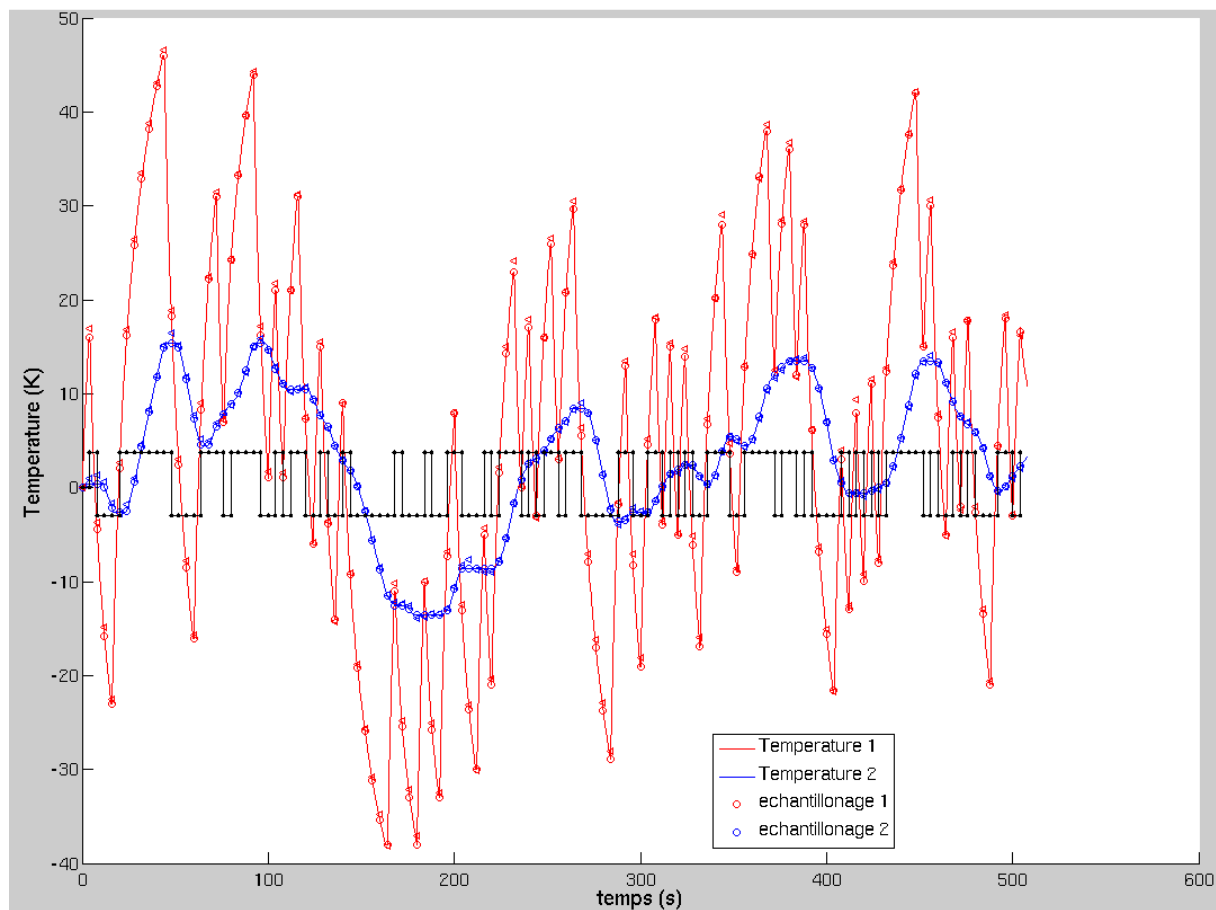
Tableau A6-19. Valeur des paramètres physiques de l'échantillon lorsqu'il est dans l'état correspondant à la séquence 6

- Pour l'échelon 7:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0049\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.4521	4.3953	-2.4352	0.4920	0.6589	-1.8806	1.8160	-0.6289	0.0347
T2 ( $T_p$ )	-3.3965	4.2581	-2.3254	0.4638	0.037	-0.042	-0.0046	-0.0111	0.0208

**Tableau A6-20. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 7**



**Figure A6-15. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 7**



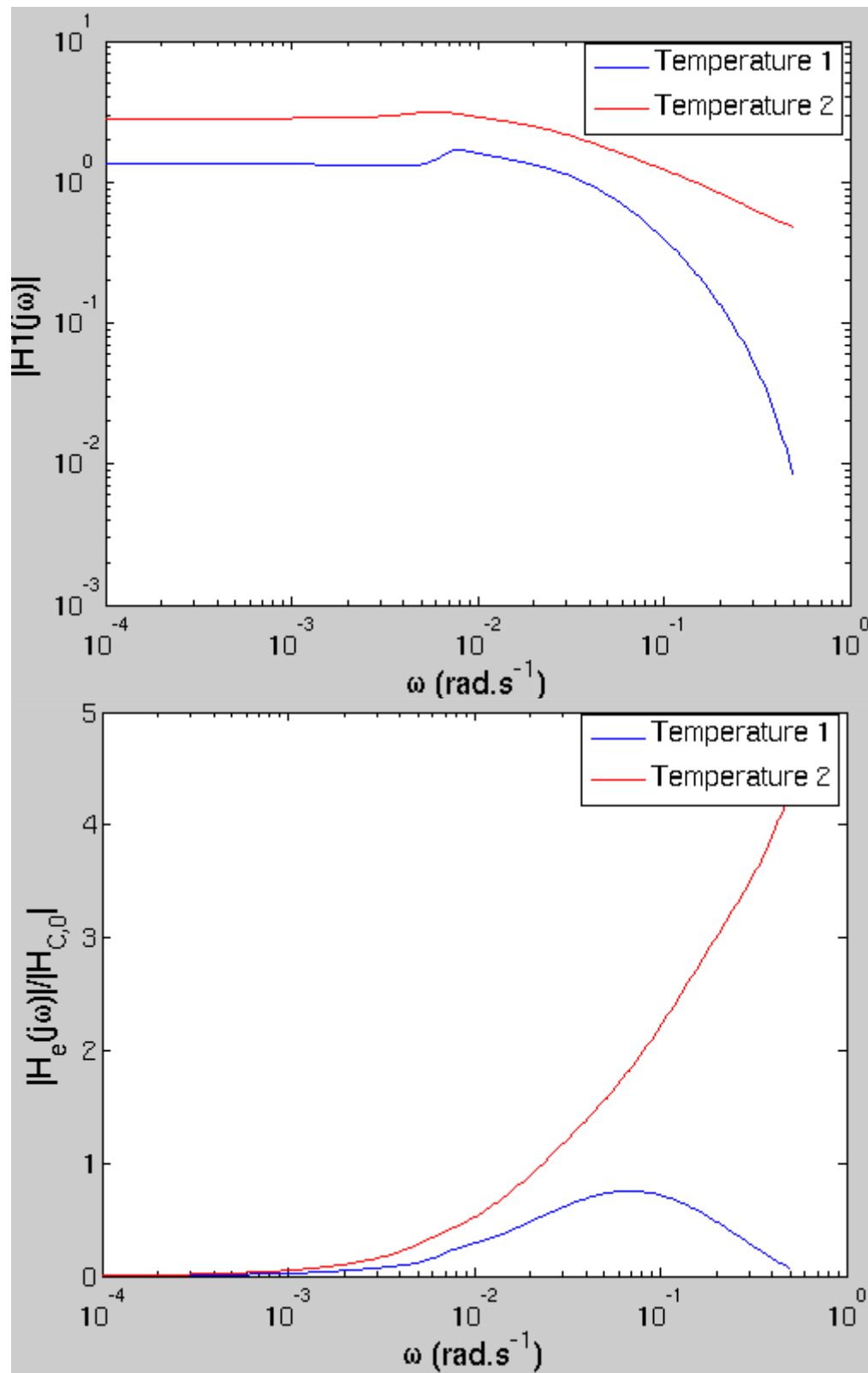


Figure A6-16. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 7

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	6.52	6.48
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	33.89	29.47

**Tableau A6-21. Temps caractéristiques pour la séquence 7**

$S_e$	Inf
$g_e$	-0.0708
$h_{\text{ext}} \text{ (W} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$	0
$h_{\text{int}} \text{ (W} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$	-2.7043
$C_p \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$	31.9227 (valeur recherchée = 20.74)
Bi	0

**Tableau A6-22. Valeur des paramètres physiques de l'échantillon lorsqu'il est dans l'état correspondant à la séquence 7**

- Pour l'échelon 8:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.005\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.5168	4.5743	-2.5998	0.5424	0.6683	-1.9671	1.9812	-0.7397	0.0575
T2 ( $T_p$ )	-3.4562	4.4146	-2.4622	0.5039	0.0337	-0.0369	-0.0139	0.0005	0.0166

**Tableau A6-23. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 8**

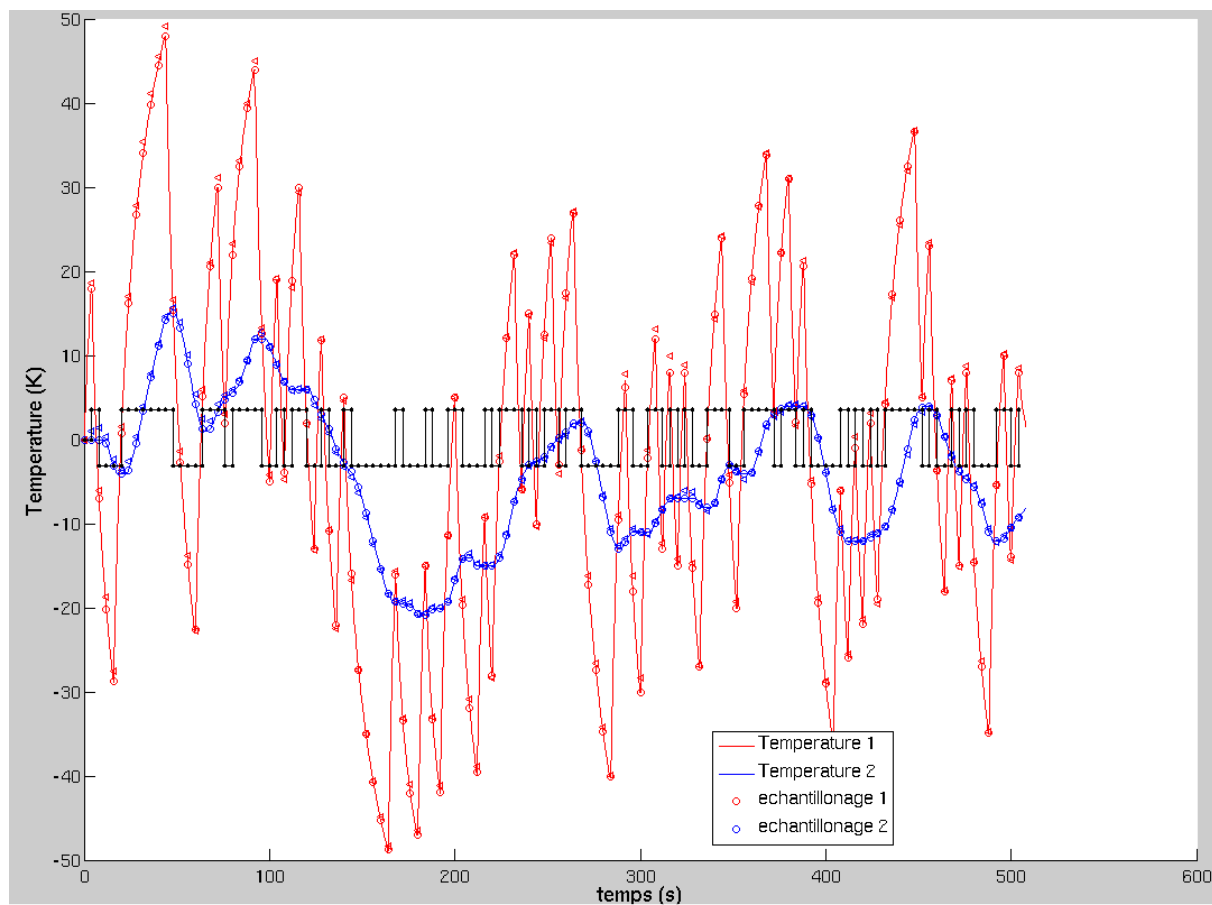
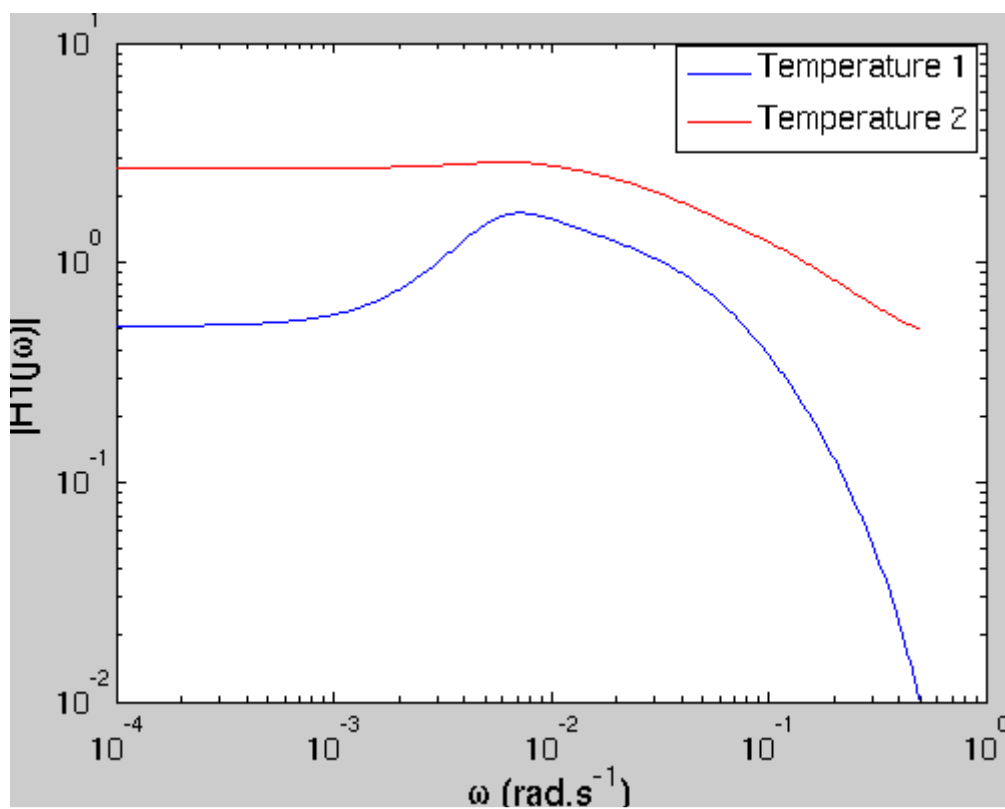
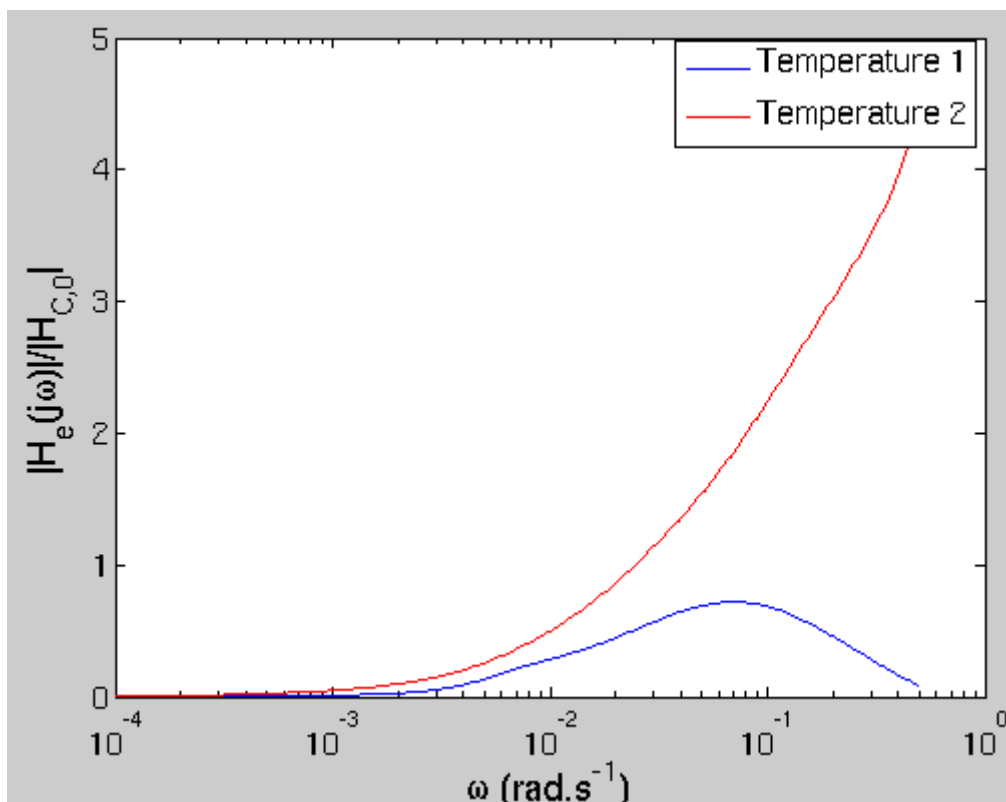


Figure A6-17. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 8





**Figure A6-18. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 8**

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	7.45	7.19
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	33.24	24.89

**Tableau A6-24. Temps caractéristiques pour la séquence 8**

$S_e$	Inf
$g_e$	0.0026
$h_{\text{ext}} \text{ (W} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$	0
$h_{\text{int}} \text{ (W} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$	207.61
$C_p \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$	25.07 (valeur recherchée = 20.74)
Bi	0

**Tableau A6-25. Valeur des paramètres physiques de l'échantillon lorsqu'il est dans l'état correspondant à la séquence 8**

D'après les résultats qui viennent d'être présentés dans cette annexe, l'étape d'identification fonctionne pour chacune des séquences. Néanmoins, les propriétés thermophysiques ne sont calculées que pour l'échelon 5. Pour les échelons 1, 2, 3, 4, 6, 7 et 8, la résolution du système proposé par Pascal Schetelat dans son article par la méthode de Gauss Seidel ne fonctionne pas.

Il faut noter que le système d'équations que j'ai proposé n'est résolu pour aucun de ces séquences. (voir Annexe 7).

## Annexe 7

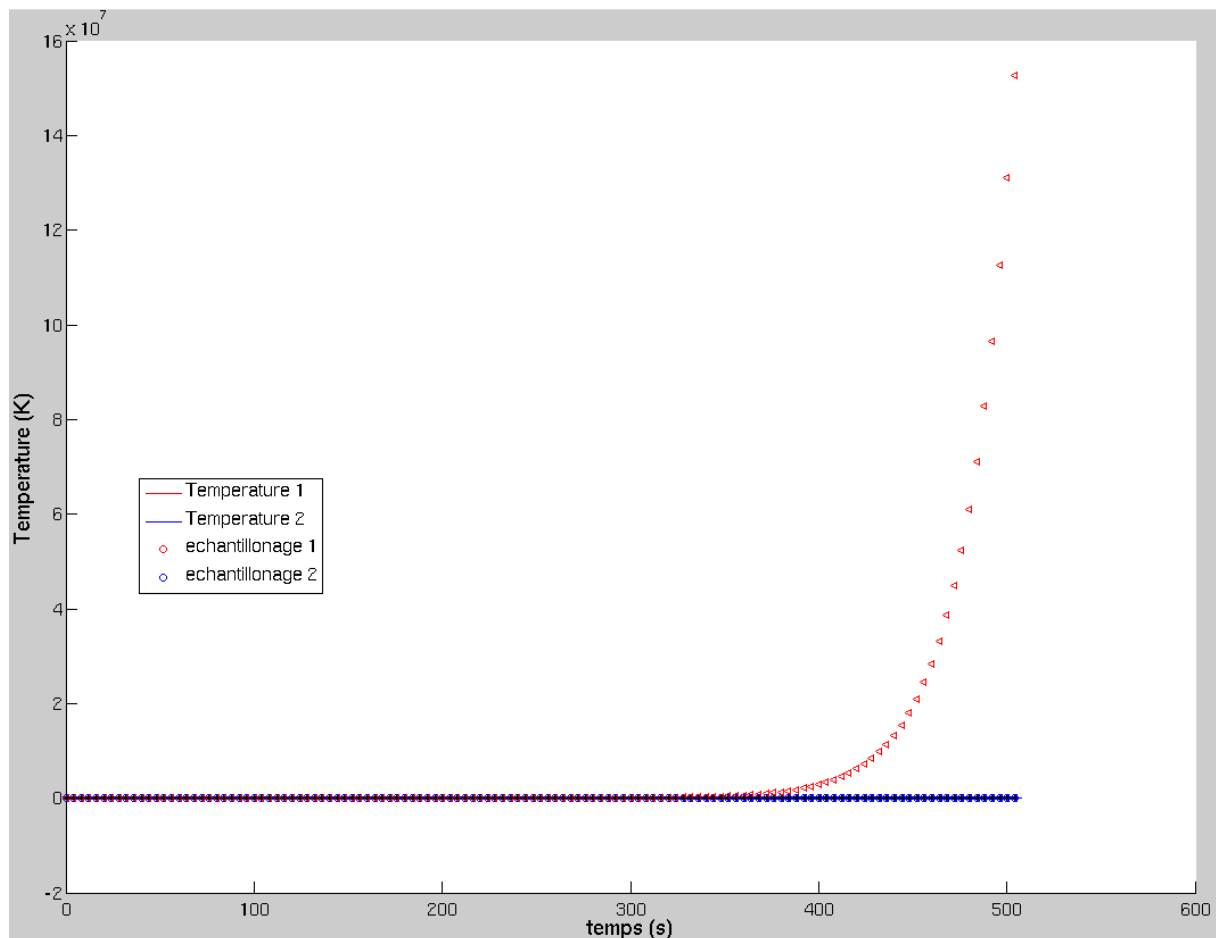
# Analyse des résultats des mesures de Pascal Schetelat avec mon programme Matlab

- Pour l'échelon 1:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0039\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 (T <sub>e</sub> )	-3.9103	5.6930	-3.6556	0.8729	0.6526	-2.1531	2.4865	-1.1288	0.1430
T2 (T <sub>p</sub> )	-3.5547	4.6961	-2.7281	0.5868	0.0249	-0.0051	-0.0576	0.0299	0.0080

**Tableau A7-1. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 1**



**Figure A7-1. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 1**

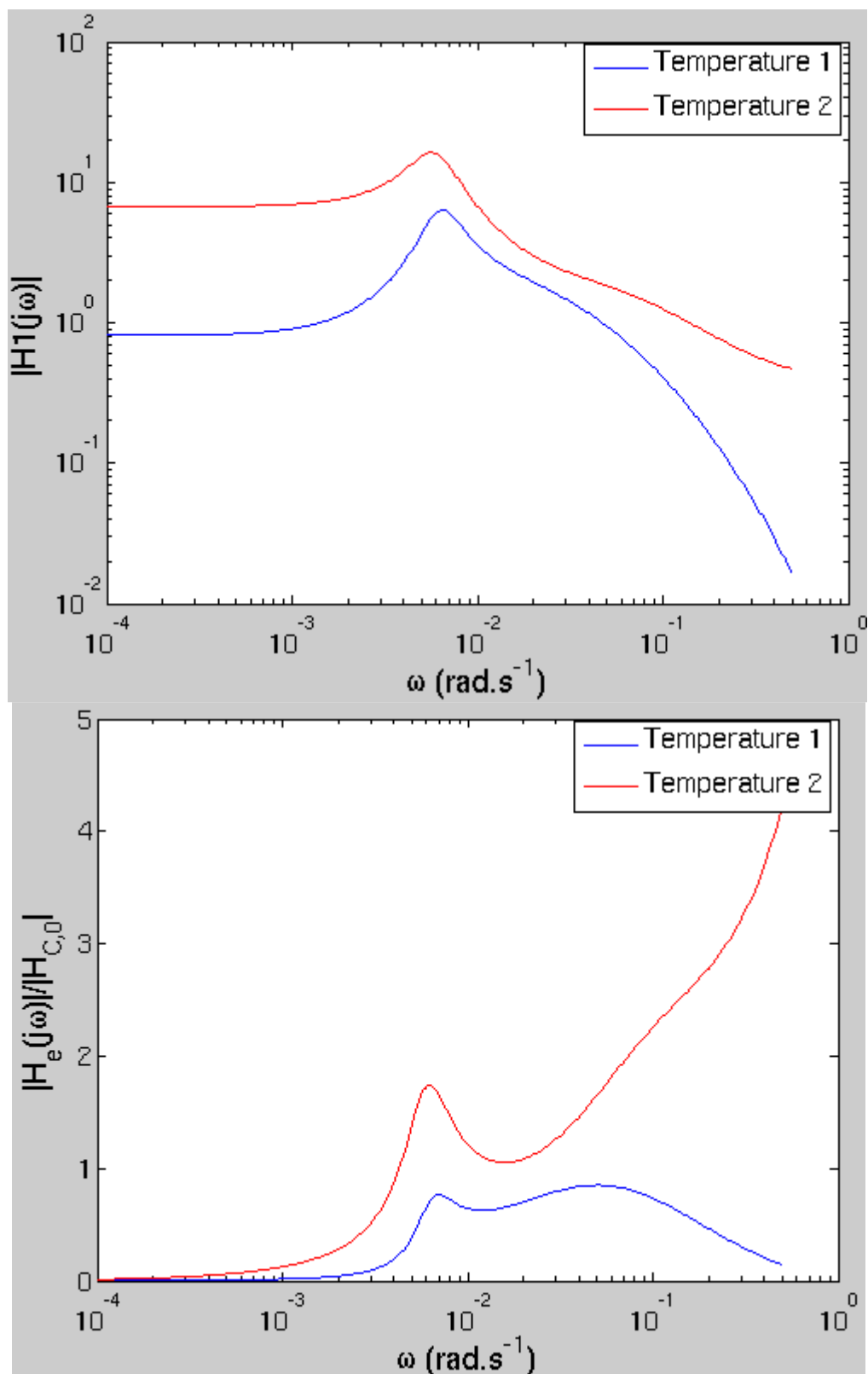


Figure A7-2. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarythmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 1

	$T_1$	$T_2$
$T_{int} (s)$	14.57	9.17
$T_{ext} (s)$	NA	36.54

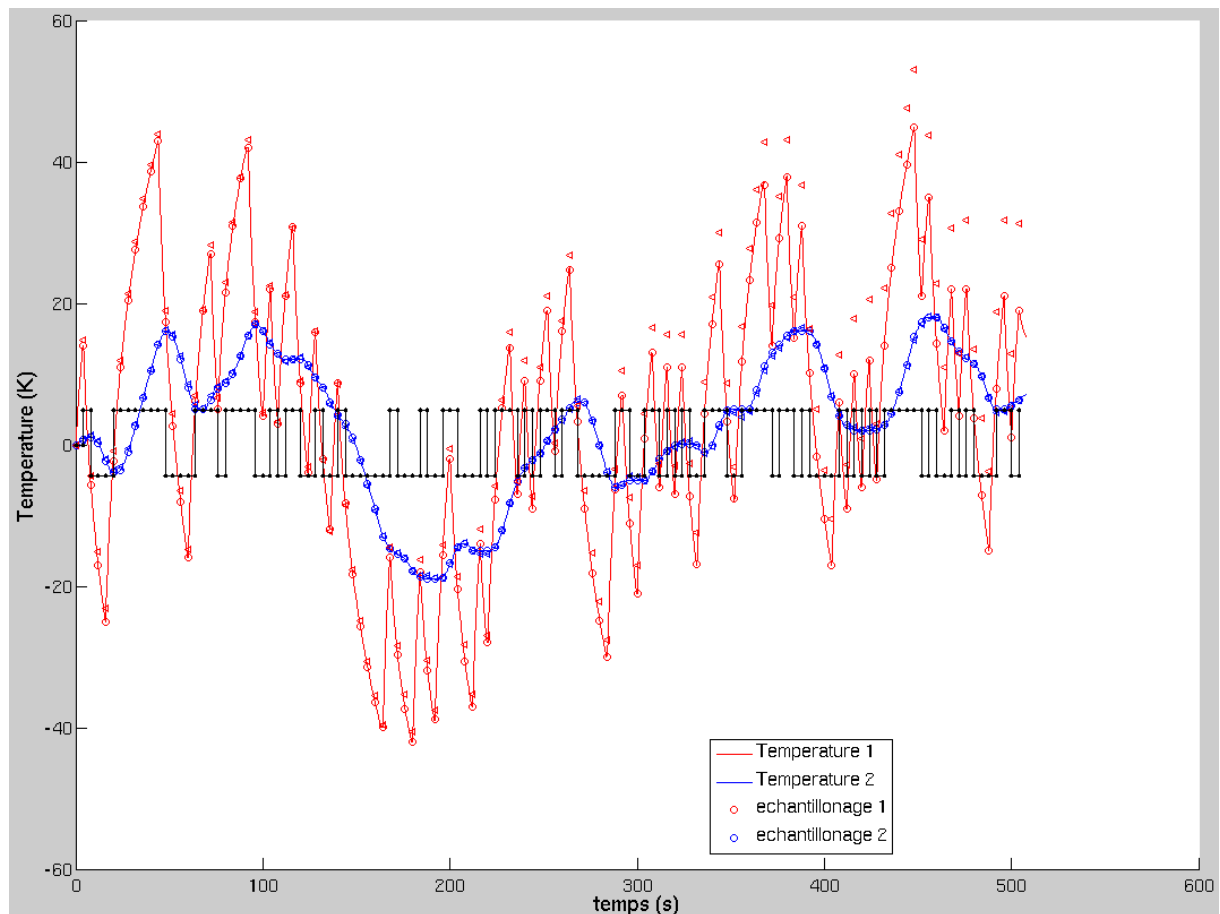
**Tableau A7-2. Temps caractéristiques pour la séquence 1**

- Pour l'échelon 2:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0039\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.6229	4.8760	-2.8837	0.6306	0.6702	-2.0114	2.0816	-0.8128	0.0724
T2 ( $T_p$ )	-3.5247	4.5828	-2.5926	0.5346	0.0347	-0.0309	-0.0236	-0.0046	0.0246

**Tableau A7-3. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 2**



**Figure A7-3. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 2**

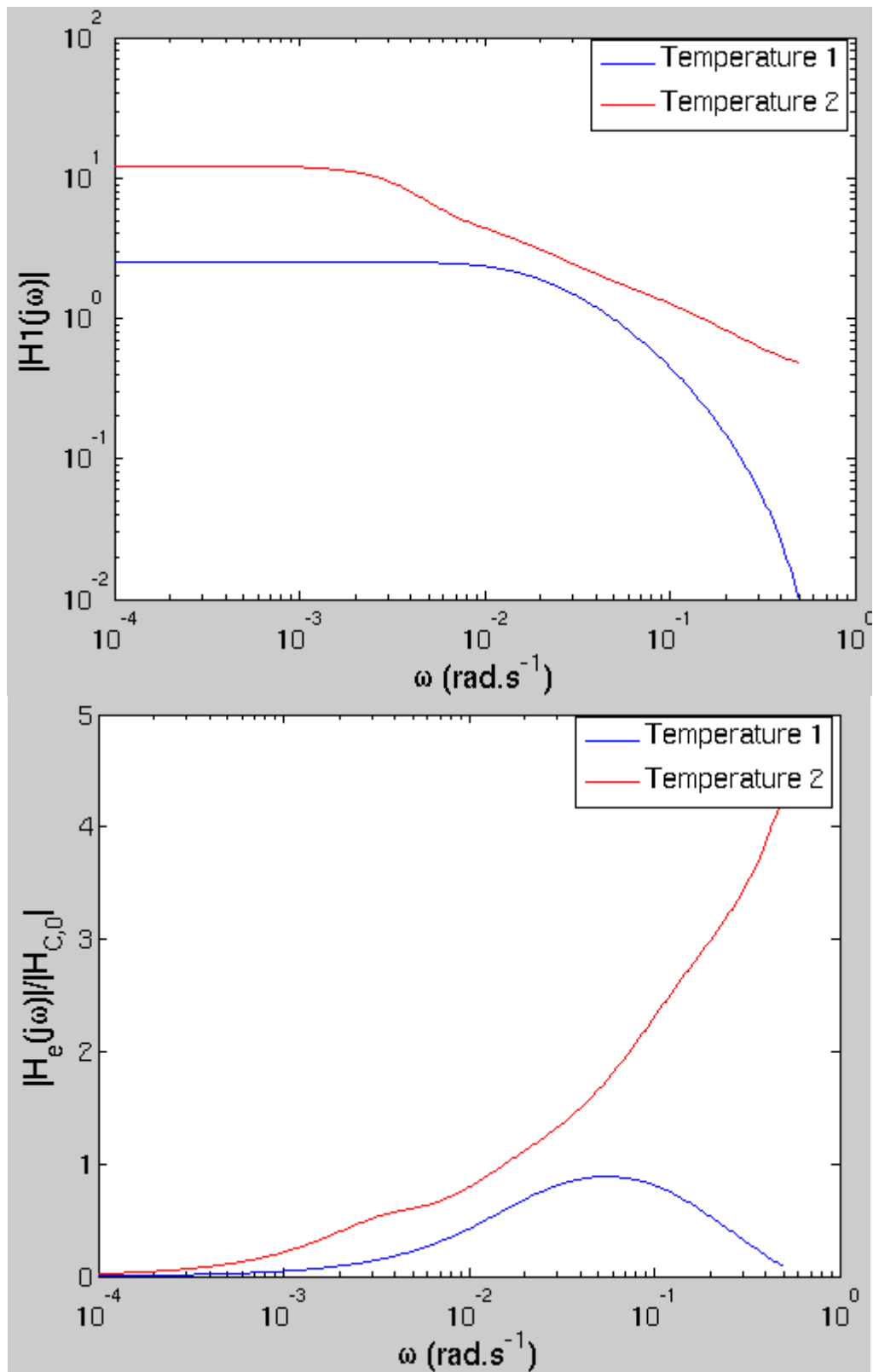


Figure A7-4. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarythmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 2



	$T_1$	$T_2$
$T_{int} (s)$	9.18	6.7
$T_{ext} (s)$	77.23	44.29

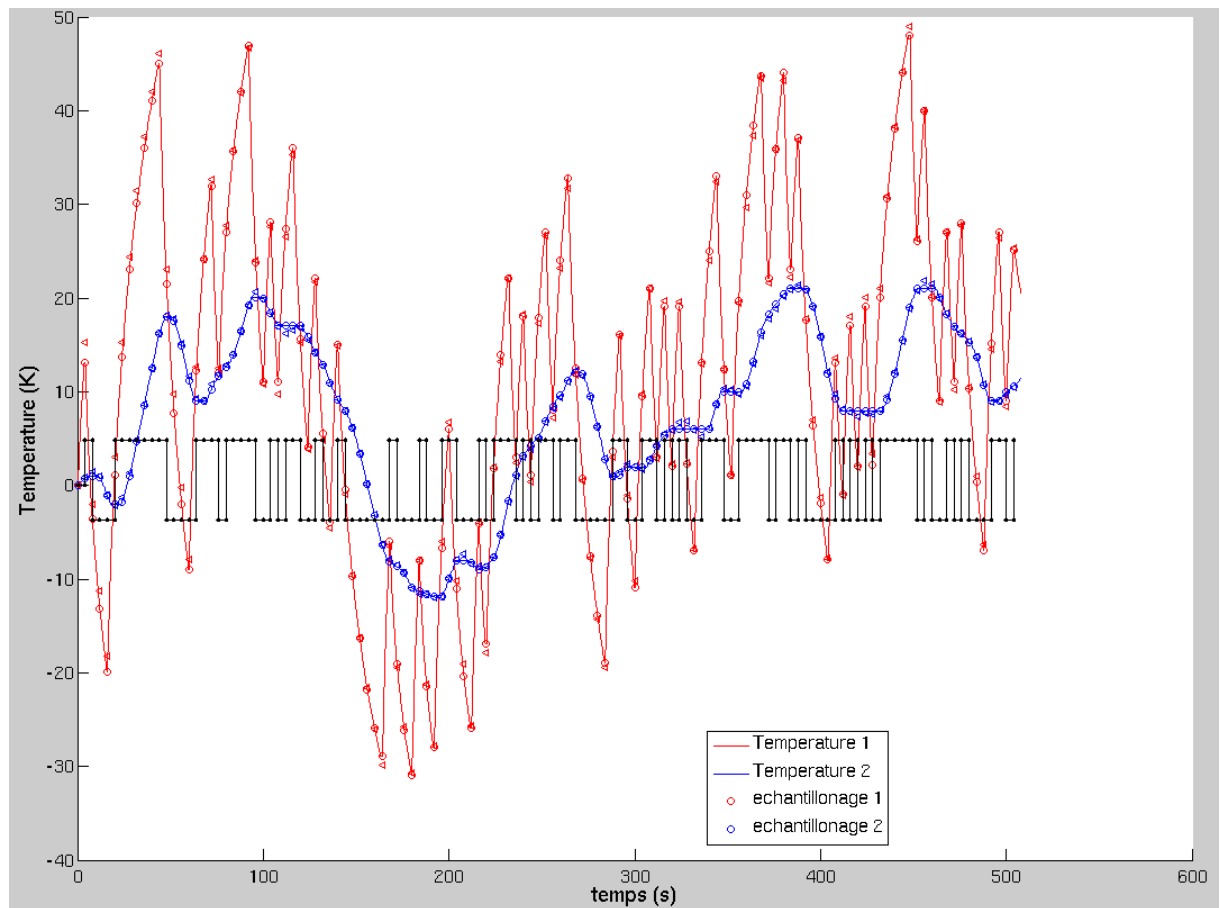
**Tableau A7-4. Temps caractéristiques pour la séquence 2**

- Pour l'échelon 3:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.004\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.5729	4.7397	-2.7607	0.5939	0.6516	-1.9232	1.9540	-0.7458	0.0634
T2 ( $T_p$ )	-3.5041	4.5364	-2.5610	0.5287	0.0368	-0.0386	-0.0143	-0.0052	0.0214

**Tableau A7-5. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 3**



**Figure A7-5. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 3**

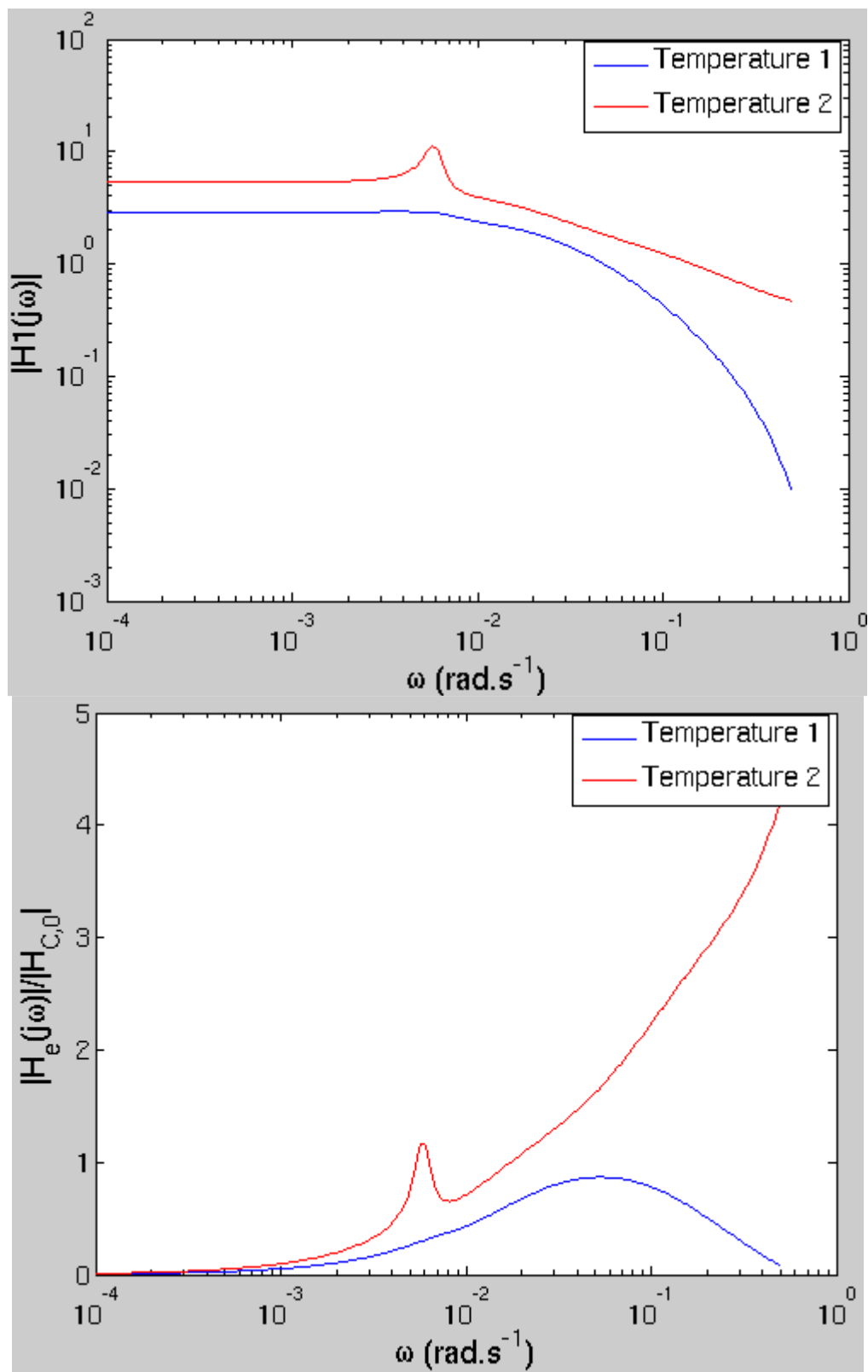


Figure A7-6. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarythmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 3

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	8.63	6.94
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	63.69	46.74

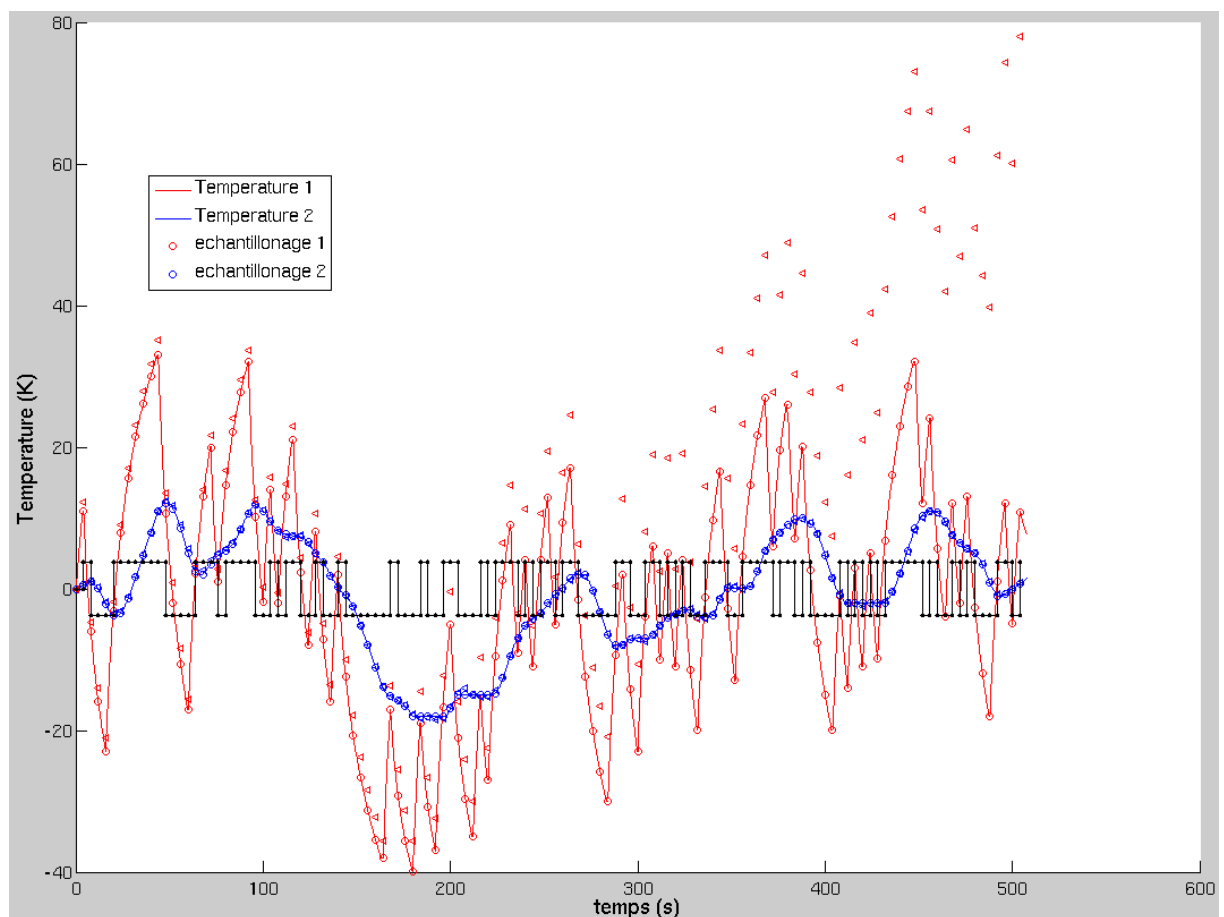
**Tableau A7-6. Temps caractéristiques pour la séquence 3**

- Pour l'échelon 4:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0044\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.6261	4.8777	-2.8779	0.6264	0.6484	-1.9510	2.0163	-0.7781	0.0646
T2 ( $T_p$ )	-3.4661	4.4397	-2.4613	0.5077	0.0333	-0.0303	-0.0174	-0.0078	0.0222

**Tableau A7-7. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 4**



**Figure A7-7. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 4**

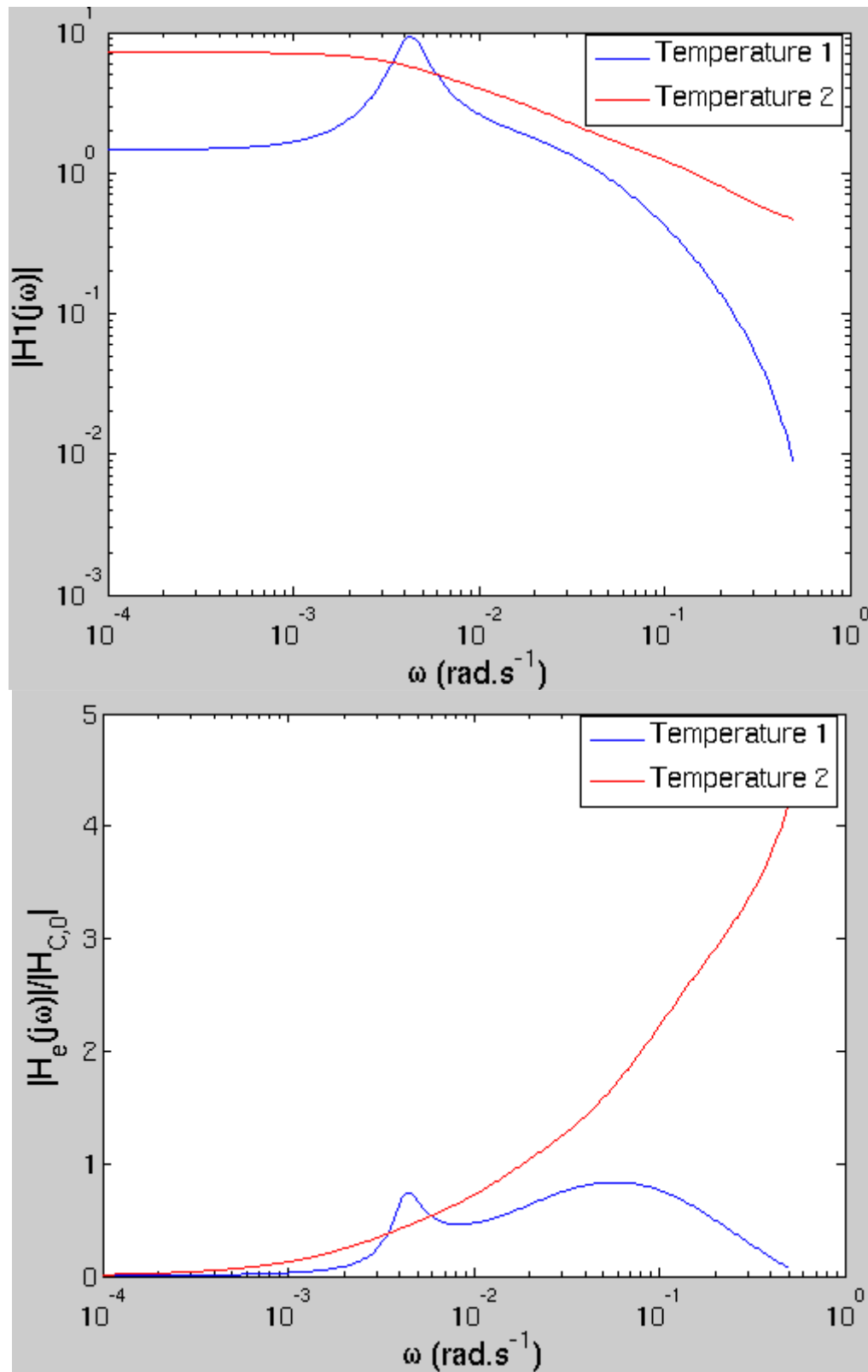


Figure A7-8. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarythmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 4

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	8.69	6.93
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	65.31	37.42

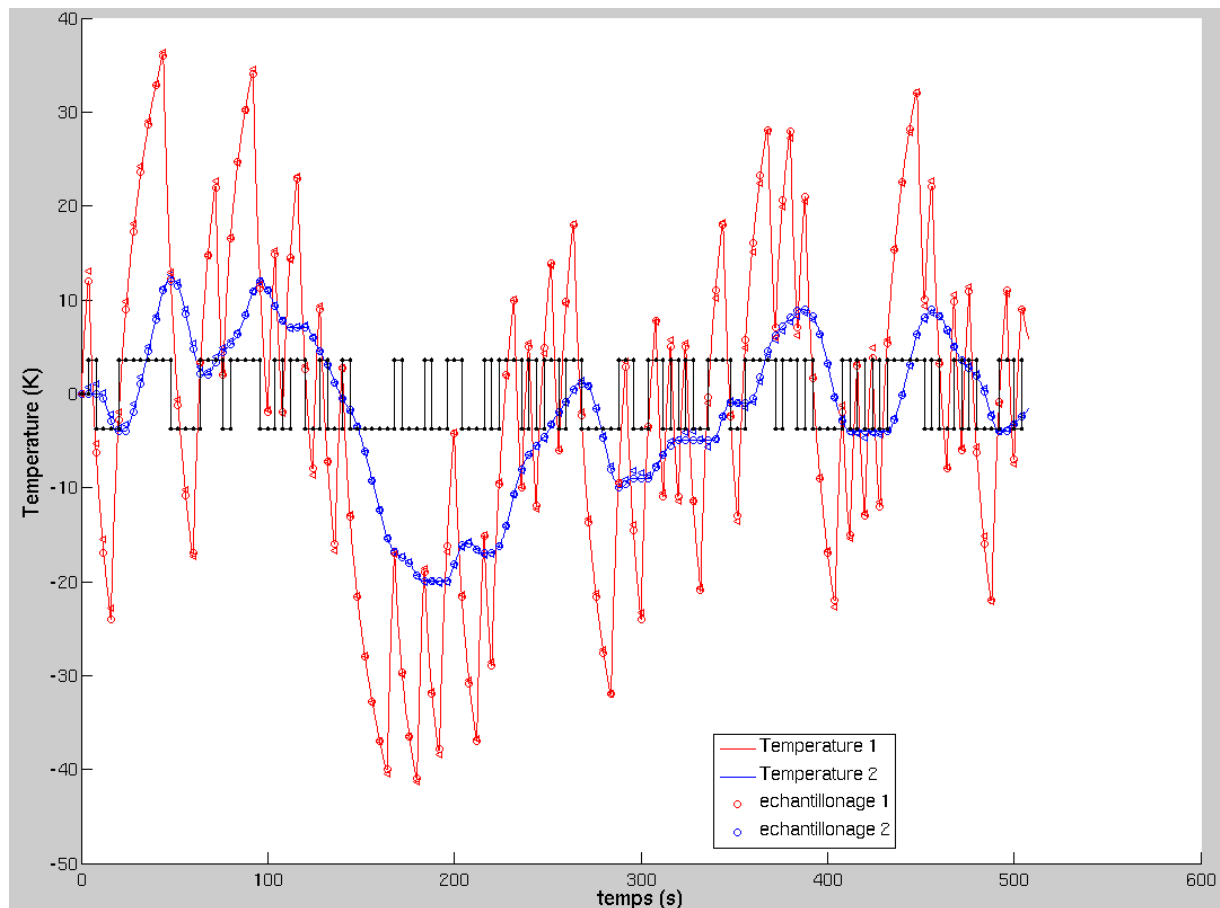
**Tableau A7-8. Temps caractéristiques pour la séquence 4**

- Pour l'échelon 5:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0046\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.4520	4.4051	-2.4535	0.5005	0.6570	-1.8647	1.7987	-0.6291	0.0379
T2 ( $T_p$ )	-3.4576	4.4068	-2.4412	0.4921	0.0343	-0.0329	-0.0156	-0.0086	0.0229

**Tableau A7-9. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 5**



**Figure A7-9. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 5**

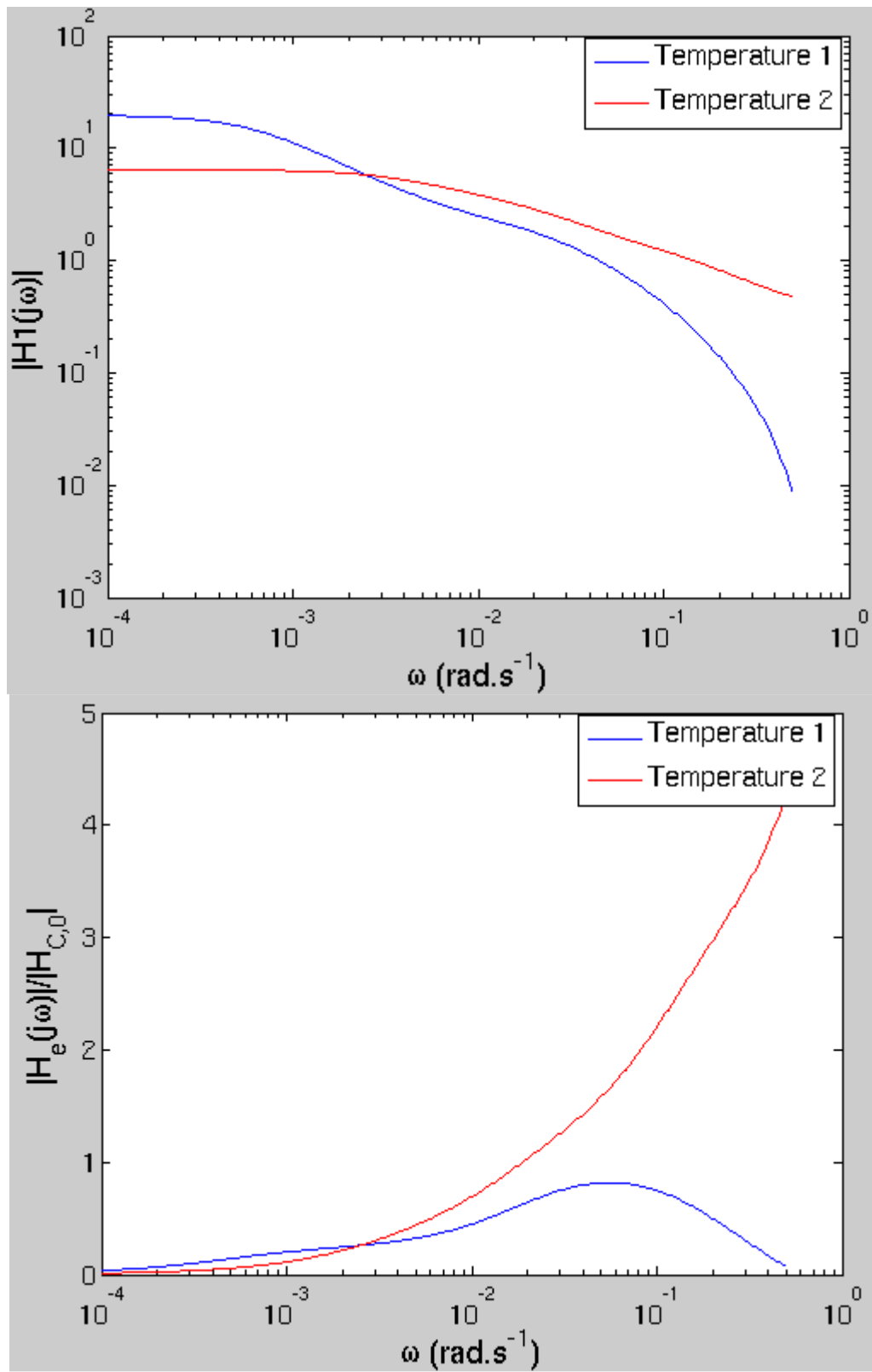


Figure A7-10. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 5

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	6.9	6.4
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	43.7	43.1

Tableau A7-10. Temps caractéristiques pour la séquence 5

- Pour l'échelon 6:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0047\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.5475	4.6546	-2.6679	0.5608	0.6748	-1.9847	1.9897	-0.7296	0.0499
T2 ( $T_p$ )	-3.4848	4.4768	-2.5003	0.5084	0.0339	-0.0316	-0.0218	-0.0013	0.0208

Tableau A7-11. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 6

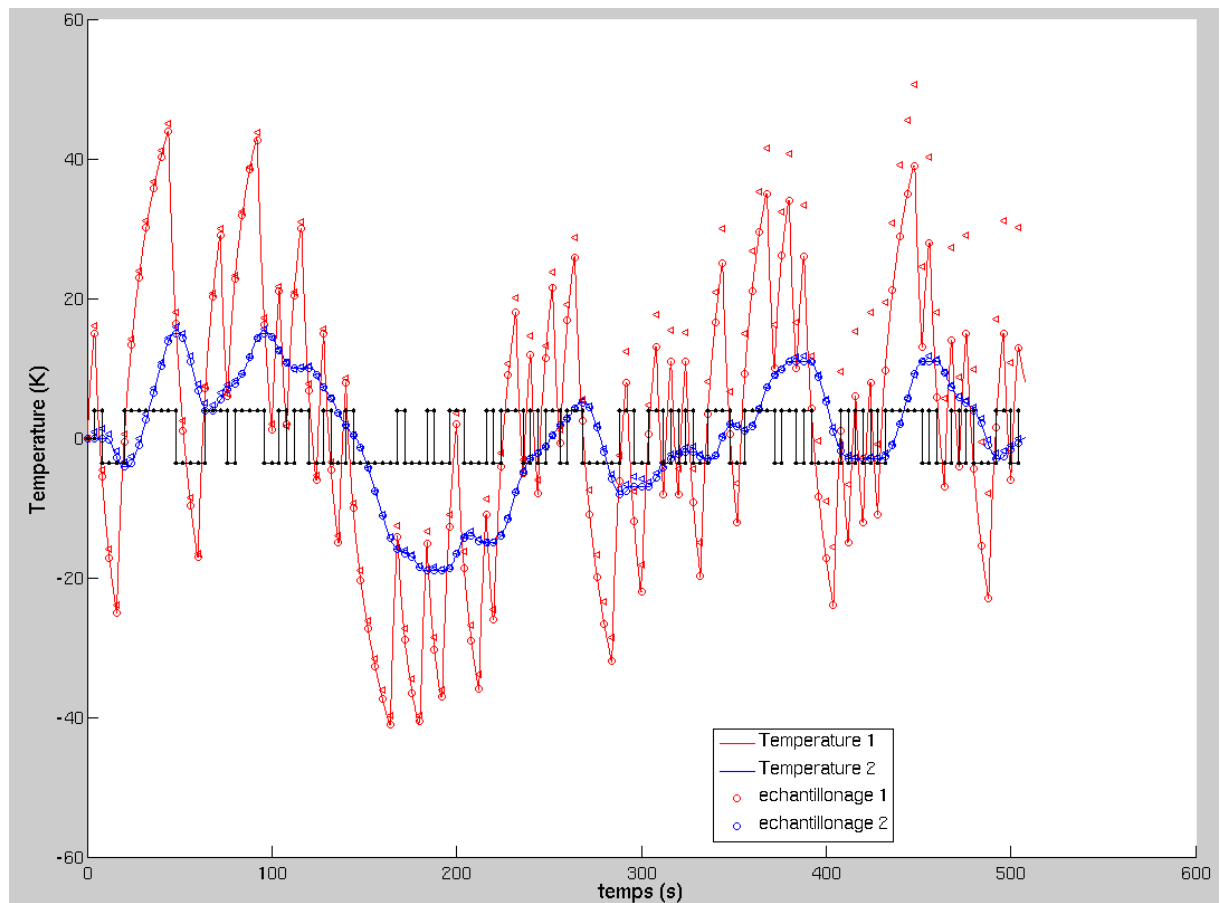


Figure A7-11. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 6

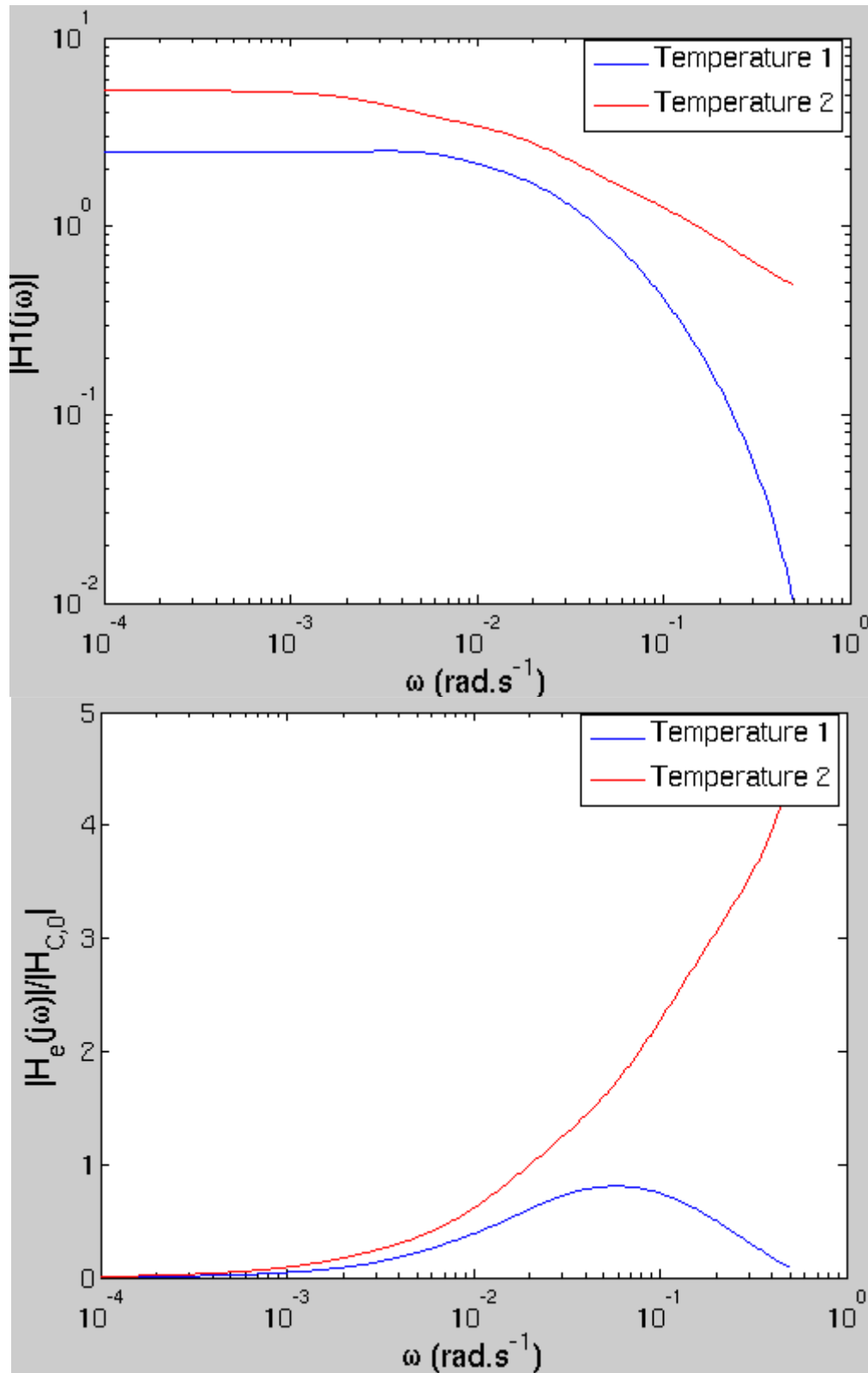


Figure A7-12. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 6



	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	7.42	6.49
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	49.21	40.76

Tableau A7-12. Temps caractéristiques pour la séquence 6

- Pour l'échelon 7:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.0049\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.5364	4.6282	-2.6485	0.5567	0.6555	-1.9286	1.9360	-0.7128	0.0499
T2 ( $T_p$ )	-3.4339	4.3477	-2.3945	0.4807	0.0351	-0.0387	-0.0089	-0.0083	0.0209

Tableau A7-13. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 7

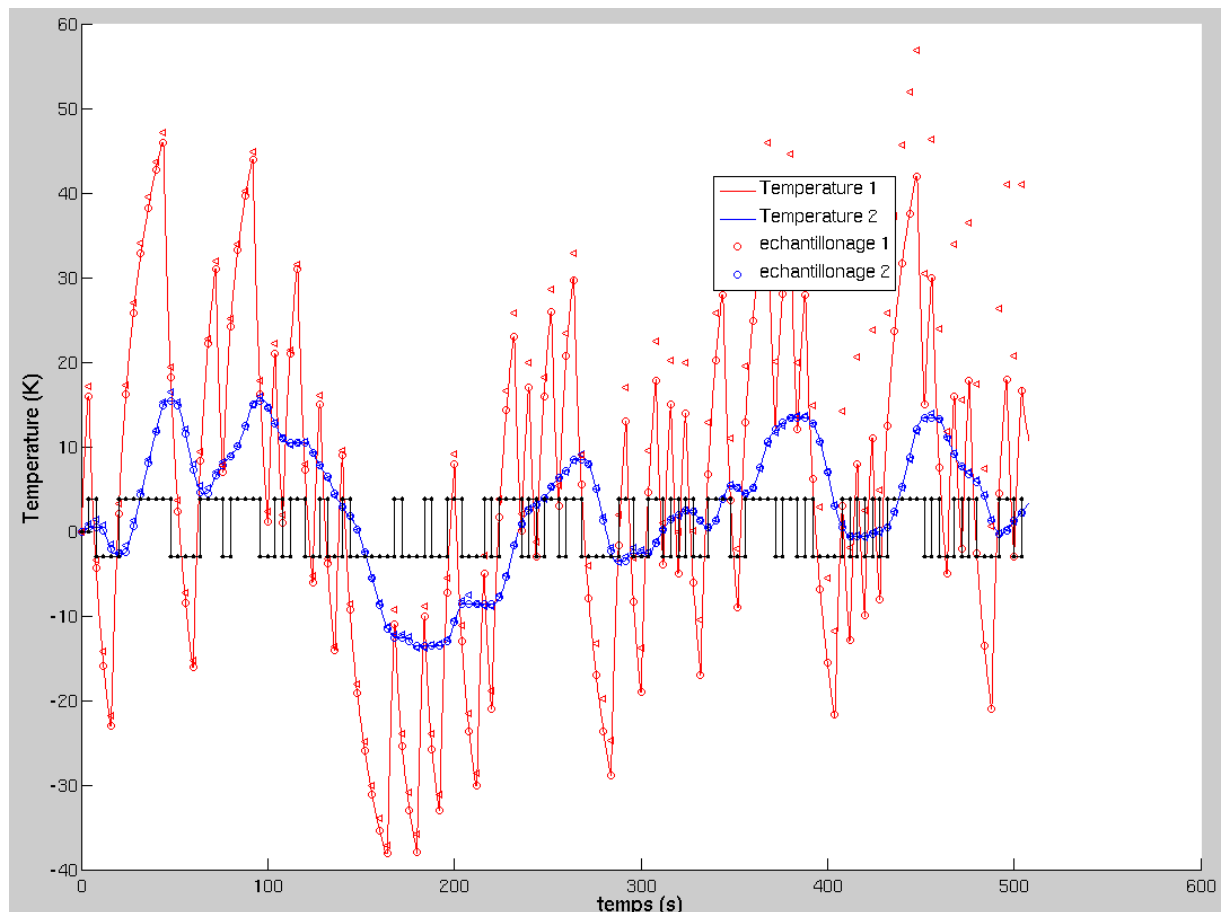


Figure A7-13. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 7

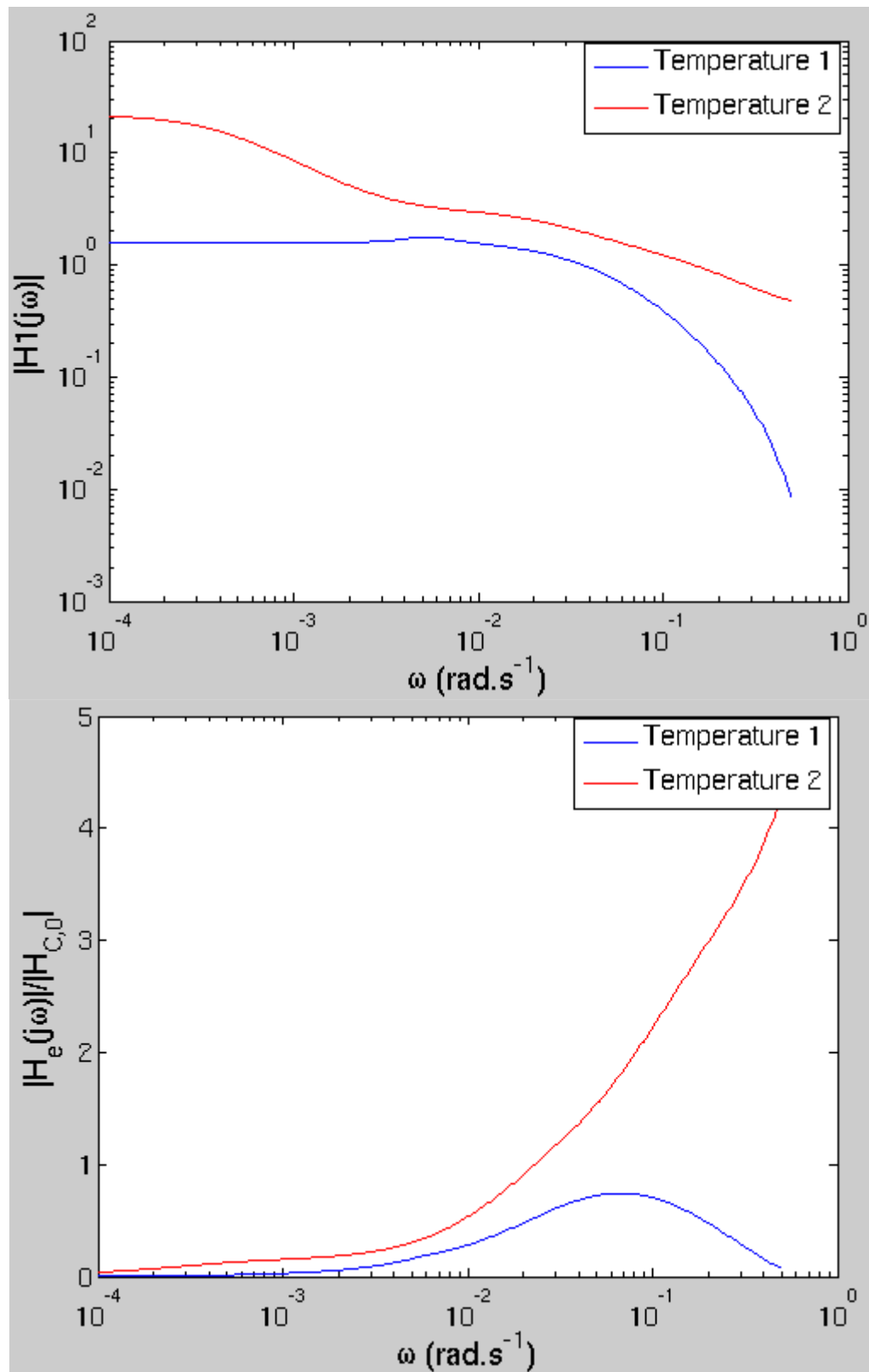


Figure A7-14. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarythmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 7

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	7.6	6.44
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	42.9	30.71

Tableau A7-14. Temps caractéristiques pour la séquence 7

- Pour l'échelon 8:

Estimation de la puissance utilisée dans le programme Matlab:  $G_H = \frac{P_o}{I_0^2} = 0.005\Omega$

	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3	B4
T1 ( $T_e$ )	-3.6362	4.9091	-2.9109	0.6381	0.666	-2.0432	2.1663	-0.8722	0.0831
T2 ( $T_p$ )	-3.4717	4.4609	-2.5082	0.5190	0.0323	-0.0333	-0.0197	0.0072	0.0135

Tableau A7-15. Fonctions de transferts des températures pour la séquence 8

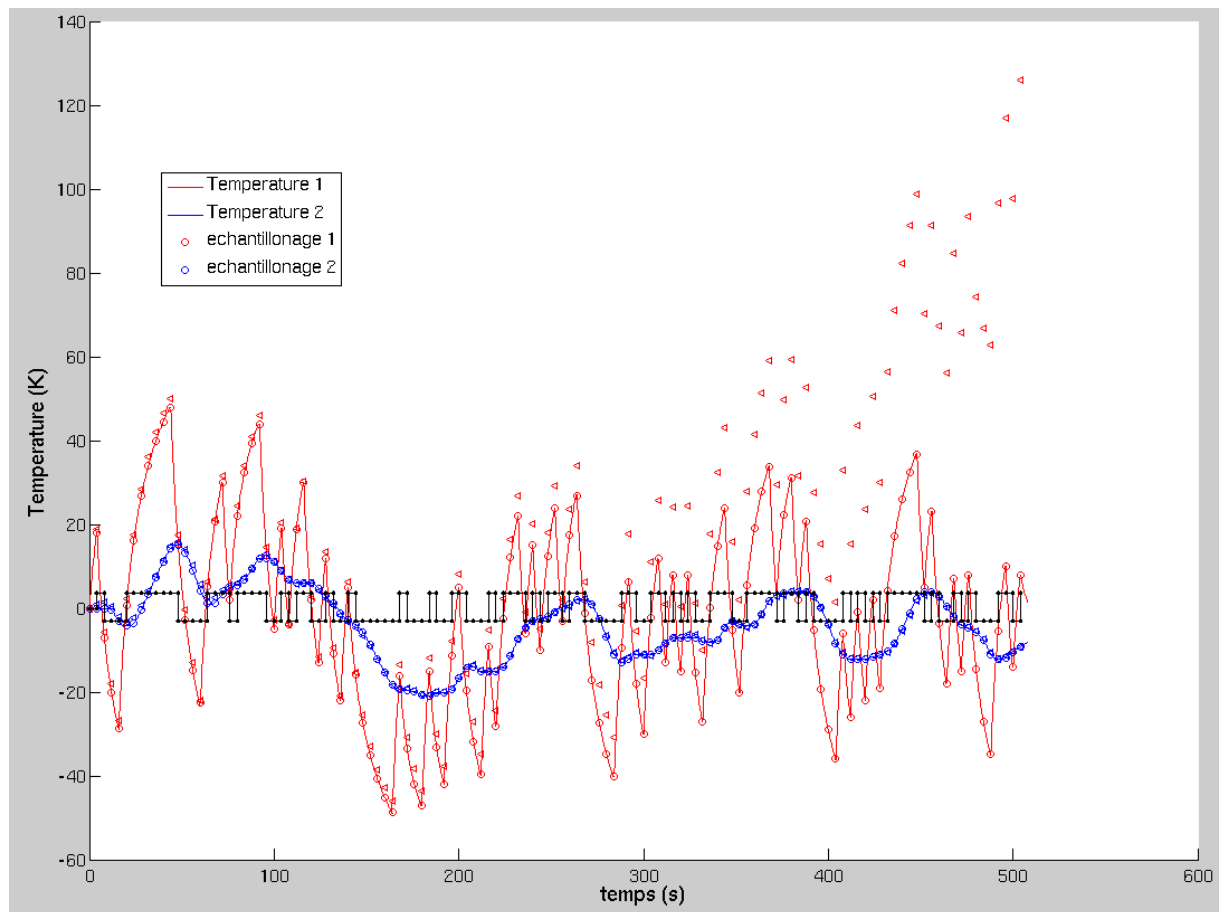


Figure A7-15. Températures mesurées et identifiées sous Matlab pour la séquence 8

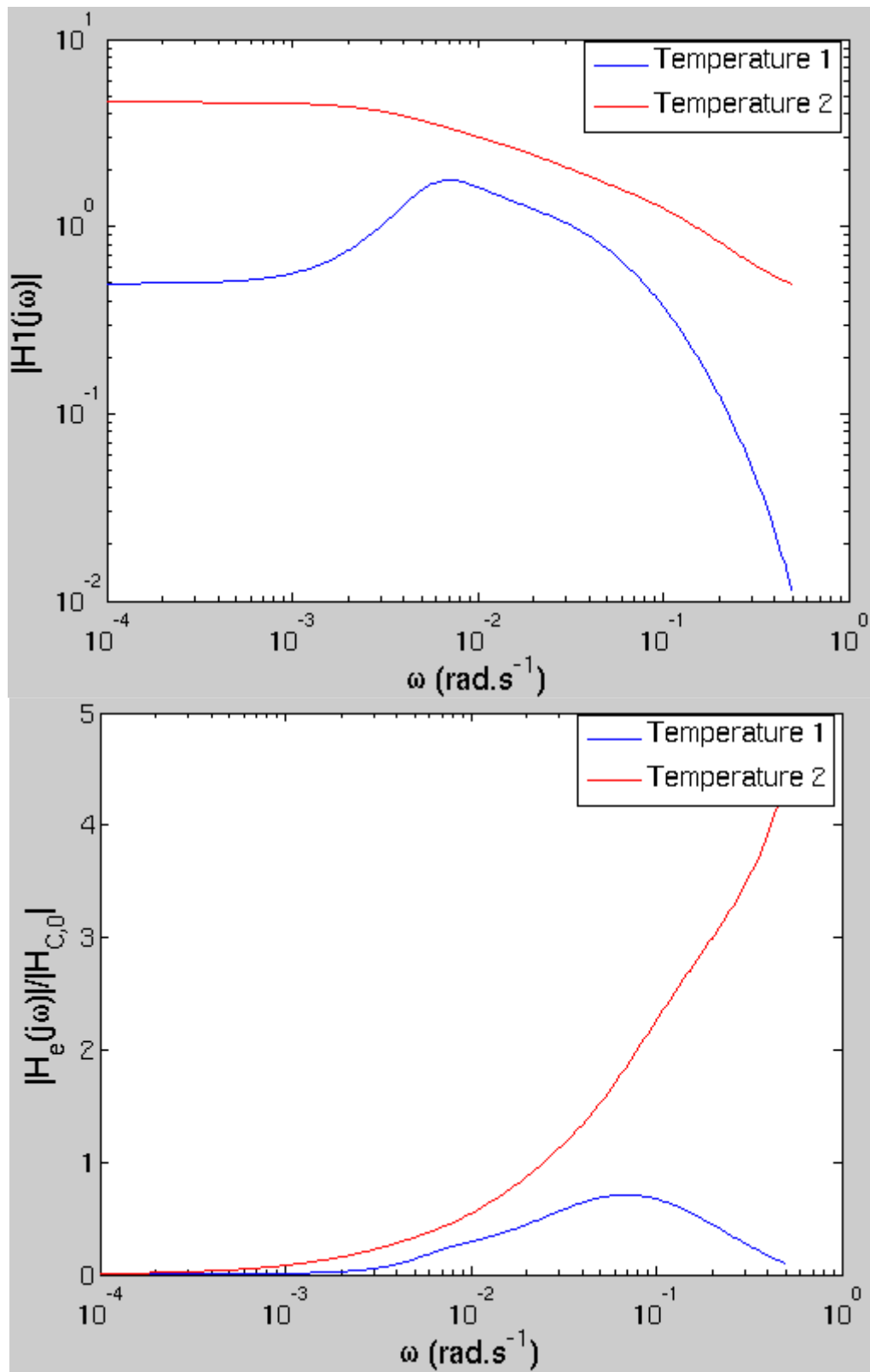


Figure A7-16. Fonctions de transfert polaire et équatoriale en haut sous forme logarithmique en bas sous forme normalisée – pour l'échelon 8

	$T_1$	$T_2$
$T_{\text{int}} \text{ (s)}$	9.25	7.67
$T_{\text{ext}} \text{ (s)}$	49.87	24.49

**Tableau A7-16. Temps caractéristiques pour la séquence 8**

Comment on peut voir, avec les données de P. Schetelat et mon programme Matlab, l'identification est seulement valide pour le 3ème et 5ème séquence. Aussi faire noter que l'algorithme de Gauss-seidel pour trouver les propriétés physiques du niobium donnée aucun résultat valide.

## Annexe 8

---

# Comparaison des expériences de Pascal Schetelat et Marc Garcia

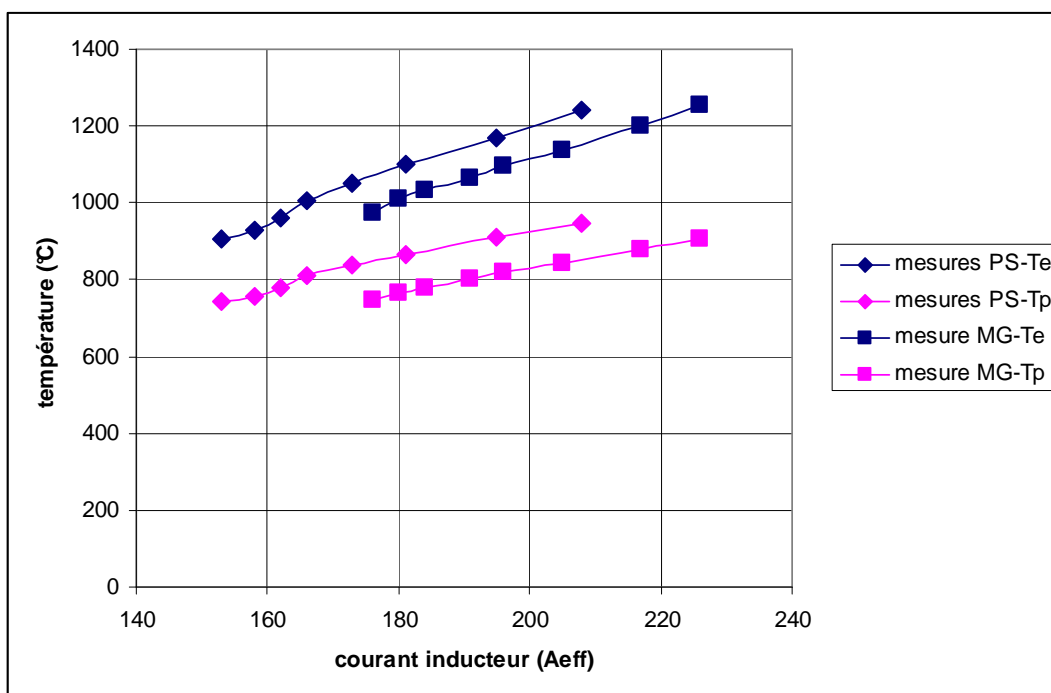
Expérience avec le barreau de Niobium:

Echelon	Amplitude du courant (A)	Amplitude de modulation (%)	$T_e$ (°C)	$T_p$ (°C)
1	153	10	905	745
2	158	10	927	757
3	162	9	961	780
4	166	8	1005	809
5	173	8	1050	837
6	181	8	1099	866
7	195	7	1170	909
8	208	7	1240	946

Tableau A8-1. Tableau résumé des expériences de PS

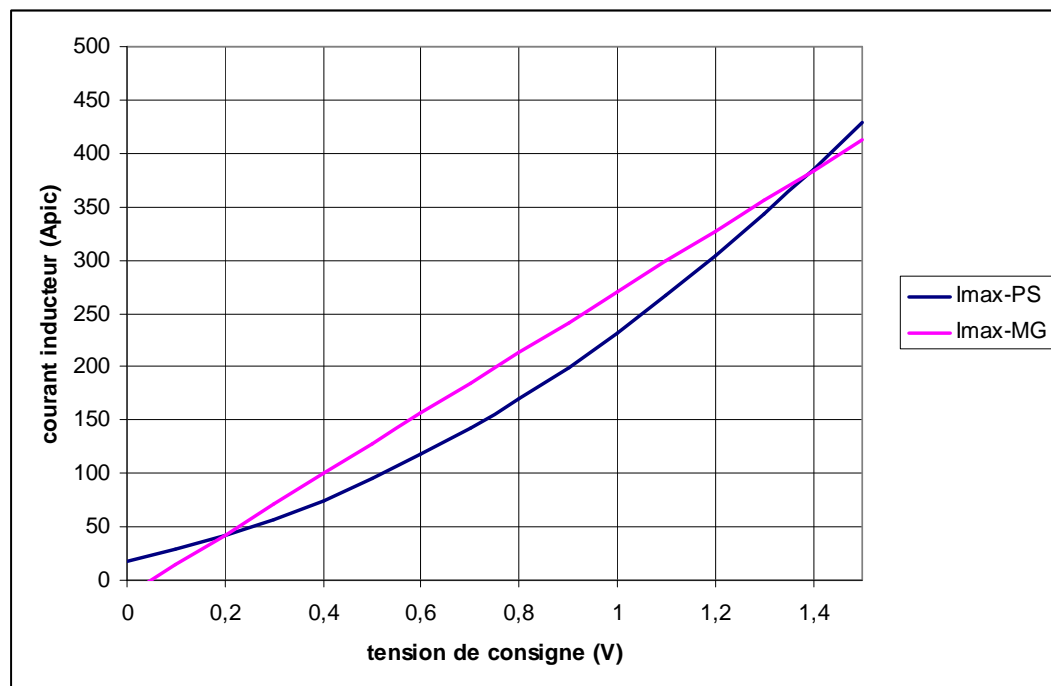
N° échelon	Amplitude du courant (A)	Amplitude de modulation (%)	$\bar{T}_e$ (°C)	$\bar{T}_p$ (°C)
1N	176	10	973	746
2N	180	10	1010	767
3N	184	9	1034	781
4N	191	8	1065	801
5N	196	8	1095	820
6N	205	8	1138	844
7N	217	7	1201	877
8N	226	7	1255	905

Tableau A8-2. Tableau résumé des expériences de MG



**Figure A8-1. Comparaison entre les expériences de PS et MG de le courant en fonction de la température**

Les courants sont des courants efficaces dans les deux cas. Les différences de température mesurées sont de 100°C. L'expérimentateur MG a refait les mesures 2 fois. Il est retombé sur les mêmes valeurs de température. La différence peut être attribuée à une oxydation du niobium qui modifie l'émissivité du barreau. Si tel est le cas, ce n'est pas grave car l'analyse des signaux nous affranchie de la connaissance de l'émissivité.



**Figure A8-1. Comparaison entre les expériences de PS et MG du courbe  $I_o$  ( $U_c$ )**